

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil

PROJET DE FIN D'ÉTUDE

En vu de l'obtention du diplôme de Master en génie civil
Option : Matériaux et Structures

THEME :

**ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA BRIQUE
BROYEE SUR LA RESISTANCE A LA
COMPRESSION DU BETON**

Réalisé par :

- M^r : DRADRI FATEH
- M^r : KASRI ABDELHAK

Encadré par :

- M^r : N.CHELOUAH

Jury :

- M^r : K.MEHIDI
- M^m : S.AREZKI

Promotion 2012

Remerciements

- Nous rendons grâce à Dieu le tout puissant de nous avoir donné le savoir et la volonté, surtout la patience pour réaliser ce modeste travail.
- Nous remercions notre promoteur Mr N. CHELOUAH, en sa qualité d'encadreur, pour sa gentillesse, ses précieux conseils et pour la confiance qu'elle nous a témoigné en dirigeant ce travail.
- Nous remercions les membres de jury Mr MEHIDI Khaled et Mm S.AREZKI pour accepter d'examiner ce mémoire et juger ce travail, on leur exprime toute notre gratitude pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail.
- Nous remercions également M^r ZOUBIRI technicien du laboratoire béton.
- Nous tenons à remercier profondément et sincèrement tous ceux qui nous ont aidé, conseillé, orienté et encouragé dans la réalisation de ce travail ;
- Enfin, nous remercions vivement tous ceux qui ont contribué à notre formation, qui nous ont transmis le savoir et la bonne conduite.

Abdelhak et Fatah

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma très chère

mère qui a tant donné pour me voir réussir ;

A ma chère grande mère ;

A mes très chers frère lamri ;

A mes très chères tantes et oncles ;

A toute ma famille ;

A mon binôme Kasri et à sa famille ;

A tous les membres du club scientifique de
Génie Civil ;

A tous mes amis sans exception.

F.DRADRI.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma très chère

mère qui a tant donné pour me voir réussir ;

A ma chère grande mère ;

A mes très chers frères Toufik, Fayçal ;

A mes très chères tantes et oncles ;

A toute ma famille ;

A mon binôme Fatah et à sa famille ;

A tous les membres du club scientifique de
Génie Civil ;

A tous mes amis sans exception.

A. KASRI.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Partie théorique

Chapitre 1 :.....	généralités
--------------------------	--------------------

1-1 granulat.....	3
-------------------	---

1-2 matériaux pouzzolaniques.....	10
-----------------------------------	----

1-3 les ciments	13
-----------------------	----

1- 4 Eau de gâchage.....	24
--------------------------	----

1- 5 les adjuvants.....	26
-------------------------	----

Partie pratique

Chapitre 2 :	caractéristiques des matériaux
---------------------------	---------------------------------------

2-1 Les granulats	30
-------------------------	----

2-2 Analyse granulométrique	31
-----------------------------------	----

2-3 Mesure de la propreté des granulats	45
---	----

2-3-1 Calcul de la teneur en impuretés.....	45
---	----

2-3-2 Détermination de la propreté des sables.....	46
--	----

2-4 Détermination de masses volumiques absolues et apparentes des granulats	51
--	----

2-4-1Détermination de la masse volumique apparente	51
--	----

2-4-2 Détermination de la masse volumique absolue.....	54
--	----

2-5 Teneur en eau des granulats	57
---------------------------------------	----

2-6 Caractéristiques intrinsèques des granulats	60
---	----

2-7- Mesure des temps de début et de fin de prise	63
---	----

2-8 Détermination de la stabilité par l'essai CHATELIE.....67

Chapitre 3essai sur béton frais

3-1 Introduction.....70

3-2 Classification du béton70

3-3 Méthodes de compositions des bétons71

3-4 Principe de la formulation des bétons73

3-5 Méthode de DREUX-GORISSE74

3-6 Calcul de la densité théorique du béton frais88

3-7 Gâchée d'essai89

3-8 Propriétés du béton frais94

3-9 Masse volumique fraîche102

Chapitre 4 :..... essais sur béton durci.

4-1 : introduction 104

4-2 : méthode destructive d'échantillon104

4-3 : conservation des éprouvettes104

4-4 : mesure de la masse volumique apparente moyenne105

4-5 : résistance à la compression.....107

4-6 : essai de compression108

4-7 : corrections et ajustement de la formulation112

4-8: masse volumique sèche116

Chapitre 5 interprétation des résultats

Conclusion général.....122

Référence bibliographique

Lexique

Liste des tableaux

Chapitre 1 :

<u>Tableau 1-1</u> classification normalisée des granulats	5
<u>Tableau 1-2</u> classification des granulats suivant leurs masses volumiques.....	6
<u>Tableau 1-3</u> procédés généraux de la fabrication du ciment	19
<u>Tableau 1-4</u> teneur en laitier dans les ciments de haut fourneau	20
<u>Tableau 1-5</u> classification normalisées des granulats	22
<u>Tableau 1-6</u> limites tolérables	23
<u>Tableau 1-7</u> principale impureté dans l'eau.....	25

Chapitre 2 :

<u>Tableau 2-1</u> correspondance entre module et maille.....	33
<u>Tableau 2-2</u> analyse granulométrique du sable 0/3.....	36
<u>Tableau 2-3</u> analyse granulométrique du gravillon 3/8.....	37
<u>Tableau 2-4</u> analyse granulométrique du gravillon 8/15.....	37
<u>Tableau 2-5</u> analyse granulométrique du gravillon 15/25.....	37
<u>Tableau 2-6</u> : analyse granulométrique des F.B.B 3/8 mm.....	38
<u>Tableau 2-7</u> module de finesse	44
<u>Tableau 2-8</u> teneur en impureté du gravier 3/8.....	45
<u>Tableau 2-9</u> teneur en impureté du gravier 8/15.....	46
<u>Tableau 2-10</u> teneur en impureté du gravier 15/25.....	46
<u>Tableau 2-11</u> la quantité du sable en fonction de «ES».....	48
<u>Tableau 2-12</u> ES du sable du carrière	50
<u>Tableau 2-13</u> masses volumiques apparente des granulats	53

<u>Tableau 2-14</u> masses volumiques apparente des fractions 1/2 mm et 3/8 mm de briques broyées.....	53
<u>Tableau 2-15</u> masse volumique absolues des granulats.....	56
<u>Tableau 2-16</u> masse volumique absolue des fractions 1/2 mm et 3/8 mm de la brique broyées.....	56
<u>Tableau 2-17</u> teneur en eau approximative des granulats (1/m ³).....	57
<u>Tableau 2-18</u> teneur en eau des fractions 1/2 mm et 3/8 mm de briques broyées.....	58
<u>Tableau 2-19</u> composition chimique de la brique cuite.....	59
<u>Tableau 2-20</u> : charge abrasive correspondant à chaque classe granulaire.....	60
<u>Tableau 2-21</u> Mesure de coefficient Los Angeles	63
<u>Tableau 2-22</u> : charges des boulets.....	66
<u>Tableau 2-23</u> : résultats obtenues	67
<u>Chapitre 3 :</u>	
<u>Tableau 3-1</u> la composition des constituants de béton en poids et en volume ...	70
<u>Tableau 3-2</u> variation de l'ouvrabilité et de la résistance en fonction des facteurs de composition de béton.....	74
<u>Tableau 3-3</u> valeurs des coefficients (k).....	79
<u>Tableau 3-4</u> pourcentage du squelette granulaire.....	80
<u>Tableau 3-5</u> pourcentage du squelette granulaire avec F.B.B 3/8 mm.....	80
<u>Tableau 3-6</u> valeurs des tamisats de la courbe de mélange.....	81
<u>Tableau 3-7</u> valeurs compacité du béton en fonction de D _{max} de la consistance et du serrage.....	84
<u>Tableau 3-8</u> composition du béton selon Dreux-Gorisse.....	89
<u>Tableau 3-9</u> composition du béton selon Dreux-Gorisse avec F.B.B 3/8.....	89
<u>Tableau 3-10</u> dimension des moules cylindriques en fonction du diamètre maximale des granulats.....	91

Tableau 3-11 poids de chaque composants pour le béton de référence.....	93
Tableau 3-12 poids de chaque composants pour le béton avec F.B.B 3/8.....	93
<u>Tableau 3-13</u> évaluation de la consistance en fonction de l'affaissement.....	97
<u>Tableau3-14</u> : classe d'affaissement.....	97
<u>Tableau 3-15</u> affaissement obtenus au cône d'ABRAMS.....	99
<u>Tableau 3-16</u> volume d'air occlus dans les bétons.....	101
<u>Tableau 3-17</u> résultats des masses volumique fraiche.....	103

Chapitre 4 :

<u>Tableau 4-1</u> : évaluation de la masse volumique en fonction du temps.....	105
<u>Tableau 4-2</u> résistance à la compression au 7 ^{ième} jours.....	111
<u>Tableau 4-3</u> résistance à la compression au 28 ^{ième} jours.....	112
<u>Tableau 4-4</u> poids des éprouvettes à l'âge de 28 jours.....	113
<u>Tableau 4-5</u> masse volumique sèche du béton de référence	117
<u>Tableau 4-6</u> masse volumique sèche du béton avec F.B.B (1/2) mm.....	117
<u>Tableau 4-5</u> masse volumique sèche du béton avec F.B.B (3/8) mm.....	117

Liste des figures

Chapitre 1 :

Figure 1-1 : l'adjuvant : plastifiant réducteur d'eau.....27

Chapitre 2 :

Figure 2.1 : Opération de quartage.....31

Figure 2-2 : Colonnes de tamis.....32

Figure 2-3 : opération de l'analyse granulométrique.....34

Figure 2-4: courbe granulométrique du sable 0/3 mm.....39

Figure 2-5 : courbe granulométrique du gravillon 3/8 mm.....40

Figure 2-6 : courbe granulométrique du gravillon 8/15 mm.....41

Figure 2-7 : courbe granulométrique du gravillon 15/25 mm.....42

Figure 2-8 : courbe granulométrique du F.B.B 3/8 mm.....43

Figure 2-9 : équivalent du sable.....48

Figure 2-10 : équivalent du sable.....50

Figure 2.11 : Masse volumique apparente.....52

Figure 2.12 : Mesure de la masse volumique absolue.....55

Figure 2-13 appareil de Los Angeles.....61

Figure 2-14 : appareil de VICAT.....65

Figure 2-15 : appareil de l'essai le Chatelier.....68

Figure 2-16 : conduite de l'essai.....69

Chapitre 3 :

Figure 3-1: formulation du béton ordinaire par la méthode Dreux Gorisse.....77

<u>Figure 3-2</u> : formulation du béton avec F.B.B 3/8 mm par la méthode de Dreux Goriss.....	78
Figure 3-3 : dosage en eau.....	82
Figure 3-4: détermination du rapport G/S.....	87
<u>Figure 3-5</u> : schéma explicatif de l'essai d'affaissement.....	95
<u>Figure 3-6</u> : cône d'ABRAMS.....	96
<u>Figure 3-7</u> : classe d'affaissement.....	98
<u>Figure 3-8</u> : mesure du pourcentage d'air occlus à l'aéromètre à béton.....	100
<u>Figure 3-9</u> : Aéromètre.....	100
<u>Figure 3-10</u> : mesure de la masse volumique fraîche.....	102

Chapitre 4 :

<u>Figure 4-1</u> : evaluation de la masse volumique du béton en fonction du temps.....	106
<u>Figure 4-2</u> : résistance à la compression.....	107
<u>Figure 4-3</u> : principe de surfacage au soufre (ou au ciment prompt).....	109
<u>Figure 4-4</u> : exemple de dispositif de centrage de l'éprouvette.....	110

Chapitre 5 :

<u>Figure 5-1</u> : résistance à la compression.....	119
<u>Figure 5-2</u> : résistance à la compression à 7 et à 28 jours.....	120

Notations et symboles

F.B.B : fractions de la brique broyée.

C : dosage en ciment (Kg/m^3).

E : dosage en eau.

G₁ : gravier 3/8.

G₂ : gravier 8/15.

G₃ : gravier 15/25.

S : sable.

E.S : équivalent du sable.

MF : module de finesse.

F_C : résistance à la compression à l'âge (j).

H₁ : hauteur de sédiment.

H₂ : hauteur de sédiment+floculant.

P : contrainte de compression.

W : teneur en eau ;

D₀ : la densité théorique d'un mètre du béton frais.

D' : densité réelle du béton.

Al₂ O₃ : Alumine.

CaO : la chaux.

SiO₂ : la silice.

C₃ S : Silicates tricalciques.

C₂ S : Silicates bi calciques.

C₃ A : Aluminates tricalciques.

C₄ AF : Alumino-ferrite tétra calcique.

D : diamètre.

d: diamètre du plus petit granulat (mm).

R_n : masses des refus cumulés.

P : poids de l'échantillon.

M_s : masse de l'échantillon sec.

ρ_s : masse volumique spécifique.

ρ_p : masse volumique absolue.

γ: coefficient de compacité.

L : longueur de l'éprouvette.

G : gravier.

A : affaissement.

K_s : correction supplémentaire.

Résumé

L'objectif principal de cette étude est d'analyser la possibilité de valorisation des déchets de brique comme agrégats dans la fabrication du béton. L'étude expérimentale a porté essentiellement sur un seul type de granulats recyclés (de béton concassé). On a étudié trois types de béton ; béton à base d'agrégats ordinaire, et béton à base de fraction de la brique broyée 1/2mm et 3/8 mm .Les propriétés du béton avec F.B.B à l'état frais et durci sont analysées et comparées à ceux d'un béton ordinaire à base de granulats naturels. Les propriétés de granulats F.B.B sont aussi comparées à celles des granulats naturels.

Les résultats de cette étude ont montré qu'il est possible de fabriquer un béton à base d'agrégats de la brique broyée ayant des caractéristiques mécaniques acceptables.

Introduction

Introduction : [1]

Le Béton est un matériau artificiel obtenu par un mélange d'un liant (généralement du ciment), d'eau, de granulats (sables et graviers), et éventuellement d'adjuvant, le tout choisi de façon rationnelle.

Les granulats ou agrégats, qui suivant leurs dimensions, se classent en fillers, sable, gravillons et pierres, composent l'ossature de béton et jouent un rôle de remplissage, la pâte de ciment qui se forme après le gâchage à l'eau du mélange enrobe les grains de sable et de graviers, remplit les espaces entre eux et joue le rôle de lubrifiant des agrégats en communiquant au béton une certaine plasticité, nécessaire pour une mise en œuvre correcte. La pâte de ciment en durcissant, fixe les grains des granulats et donne au béton des propriétés intéressantes, notamment une bonne résistance à la compression.

Bien qu'il soit impossible de prédire avec exactitude les performances d'un béton, cependant, de nombreuses études effectuées ont permis de cerner et de quantifier le rôle des différents paramètres influents et il est possible aujourd'hui, moyennant un minimum d'étude, d'obtenir des bétons de hautes qualités.

De nos jours, et grâce à ces nombreuses qualités parmi lesquels on peut citer, une bonne résistance à la compression, une bonne isolation phonique et thermique, un coût relativement bas, le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde, et cette tendance mondiale est largement vérifiée en Algérie où le béton reste le matériau de construction par excellence.

Le but de ce projet de fin d'étude est de valoriser les déchets de briques cuites en les incorporant, sous forme de sable, dans les bétons. Les recherches consacrées à l'utilisation dans les bétons, d'un matériau récupéré ou recyclé sont donc encouragées .

Introduction

Notre travail tente d'amener une contribution à la compréhension du rôle du déchet de brique cuite de fraction 1/2mm et de fraction 3/8 mm (fractions poreuses) ; qui permet de prévoir l'effet de chaque fraction sur les performances du béton. Une comparaison avec un béton composé entièrement de sable de carrière a également fait l'objet d'une attention particulière.

1-1 Les granulats : [1]

La fin du XIX siècle marquera la révolution dans « l'art de construction » avec l'invention du ciment et du béton dans le même temps la création des réseaux de chemins de fer infrastructures routières, des ouvrages d'art nécessitaient des travaux très importants et des matériaux nouveaux et économiques.

Tous ces travaux utilisent des matières premières sous forme de morceaux de roches, soit naturels, sables et graviers soit obtenus artificiellement par concassage de roches naturelles.

Définition d'un granulat :

Les granulats, ou agrégats sont définis comme étant un ensemble de grains chimiquement inerte de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, qui mélangés à la pâte de ciment, constituent le squelette du béton. Le terme granulat est étendu à des granulats artificiels au non, utilisés dans la construction laitière granulée (sous-produit de la sidérurgie), mâchefer, déchets de briques, matériaux expansés, vermiculite, perlite liège, des granulats très durs (quartz, corindon, etc.....) ou très druses (barytines, magnétite).

1-1-1 Classification normalisées des granulats : [2]**a. Classification selon la provenance :****Les granulats roulés :**

Ce sont en général des matériaux naturels alluvionnaires, utilisés directement sans aucun traitement mécanique : ce sont notamment :

- Les sables, graviers, et cailloux issus des rivières.

- Les sables, et graviers issus des carrières.
- Les sables de mer.
- Le sable éolien des dunes.

Ces granulats sont particulièrement caractérisés par des grains de forme arrondis et un état de surface très lisse.

Granulats naturels d'origine industrielle :

Ils proviennent du concassage de roches dures telles que le granit, quartzite, le basalte, et calcaire dur, ces granulats sont caractérisés par un aspect géométrique anguleux, des arrêtes vives et un état de surface rugueux.

Les granulats lourds :

Ils sont essentiellement utilisés dans la confection des bétons lourds, matériaux utilisés dans la construction d'ouvrages nécessitant une protection biologique contre les rayonnements produits dans les accélérateurs et autres piles atomiques.

Les granulats légers :

Ce sont des granulats utilisés dans la confection de bétons légers.

Les granulats réfractaires :

Ce sont des granulats qui permettent d'obtenir des bétons résistants aux températures très élevés (jusqu'à 1000°C). Ce sont essentiellement le laitier de haut fourneau, la Pouzzolane, le Porphyre, et le Ballast. Au-delà de 1000°C, on utilise les silicates d'alumine ou les chamottes qui sont des produits obtenus par cuisson de l'argile à une température supérieure à celle d'utilisation, ceci afin d'éviter les variations dimensionnelles.

Les granulats recyclés :

Ce sont des granulats qui proviennent de la démolition d'ouvrages dégradés ou anciens.

b. Classification des granulats selon leur taille :

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à mailles carrées dans une série normalisées. La norme Algérienne **NA 452** classe les granulats en trois catégories suivant leurs dimensions, qui vont de 0,08 mm à 80 mm.

Nous trouverons les sables, les graviers ou gravillons, et les cailloux. Au-delà des limites indiquées c'est le domaine des fines et des moellons. Le tableau 1.1 indique le classement des granulats en fonction de leur taille.

Tableau 1-1 : Classification normalisée des granulats. [2]

Granulat		Ecartement des Mailles des tamis	Diamètre des trous des passoires (mm)
Fines		<0,08	
Sables	Fins	0,08 ÷ 0,315	
	Moyens	0,315 ÷ 1,25	
	Gros	1,25 ÷ 5	
Graviers	Fins		6,3 ÷ 10
	Moyens		10 ÷ 16
	Gros		16 ÷ 25
Cailloux	Petits		25 ÷ 40
	Moyens		40 ÷ 63
	Gros		63 ÷ 80
Moellons			>80

Ainsi tout granulat est désigné par deux nombres (d/D) représentant respectivement la plus petite (d) et la plus grande dimension (D) de ses grains. Tout intervalle (d/D) ainsi défini est également appelé classe granulaire.

Les dimensions (d) et (D) sont choisis dans la série suivante :

0 - 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 - 2,5 - 3,15 - 40 - 50 - 63 - 80 - 100 - 125 mm, correspondant à des tamis normalisés dont les ouvertures varient en progression géométrique de raison $10^{1/10}$.

c. Classification des granulats selon leur masse volumique :

Le classement des granulats en fonction de leur masse volumique est illustré dans le tableau suivant :

Tableau 1-2 : classification des granulats suivant leurs masses volumiques.

Classification	Masse volumique (t/m^3)
Granulat léger	$\varphi < 2$
Granulat courant	$2 \leq \varphi \leq 3$
Granulat lourd	$\varphi > 3$

1-1-2 Extraction et fabrication des granulats :

Granulat naturels :

Ce sont des granulats utilisés tels quels sans aucun traitement mécanique ou autre. Ce sont essentiellement :

Les sables de mer :

On les extrait par dragage des bancs reconnus valables, c'est-à-dire dépourvus de coquillage et de vase, et pas trop fins. Très purs, ils sont parmi les meilleurs sables après lavage, ils sont cependant à éviter avec certains liants comme alumineux par exemple.

Les granulats de rivière :

Leur extraction s'opère soit par dragage du lit des cours d'eau aux endroits donnant des matériaux siliceux propres et durs, soit par pompage (suceuse) d'anciens lits noyés dans la nappe phréatique, après enlèvement de la découverte soit à la pelle mécanique à certaines époques de l'année.

Les granulats de carrière à ciel ouvert :

Il s'agit de granulats issus de couches sédimentaires déposées par d'anciennes rivières ou par la mer : leur extraction se fait à la pelle mécanique, après ou non abattage à l'explosif. Ils sont souvent terreux, argileux, et nécessitant un lavage poussé avant l'utilisation.

Les granulats concassés :

Ce sont des granulats obtenus industriellement selon le procédé technologique général suivant :

Concassage et broyage de la roche :

La fragmentation des matériaux se fait par concassage et broyage, le distingue entre les deux termes relevant de l'usage. Les producteurs de granulats appellent concassage la fragmentation grossière et broyage l'élaboration de sables, petits gravillons et fillers.

Les appareils utilisés pour le concassage se divisent en trois grandes catégories :

- Les appareils travaillant par écrasement lent.
- Les appareils travaillant par choc.
- Les appareils à effets multiples, travaillant éventuellement par gravité.

Lavage des granulats :

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

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

1-1-3 Rôle des granulats dans le béton :

Les sables :

Les sables entrent dans la composition des mortiers, des bétons, des matériaux préfabriqués où ils participent à la résistance à l'écrasement, d'où la recherche d'un sable dur, et compact. C'est souvent par la médiocre qualité du sable que périssent les bétons. Il faut que les grains de sable demeurent plus durs que la pâte de ciment durci qui les enveloppe : ils donnent de la cohésion au mélange, mortier ou béton.

A côté des rôles cités précédemment :

- Il permet l'économie de liant sans réduire la résistance du mélange.
- Il facilite la prise en assurant la porosité du mortier, et son aération.

- Il combat le retrait du ciment pur et atténue le gonflement du mortier de chaux.
- Il constitue un excellent terrain de fondation, s'il n'est pas affouillé, du fait de son incompressibilité et de sa mobilité, ce qui permet une bonne répartition des pressions.
- Il constitue un lit sous carrelage, et permet l'enrobage des canalisations.

Les gravillons et cailloux :

Ils s'associent au mortier de sable, pour constituer un matériau nouveau : le béton, en participant également à la résistance à l'écrasement, aussi bien dans les bétons hydrauliques (béton armé et précontraint) de la construction, que dans les bétons hydrocarbonés des travaux routiers.

Ils constituent de bonnes fondations prises en masse dans le sable. Ils servent également comme hérissonnages dans les dallages. Enfin on s'en sert comme couche drainage dans les fondations. D'où la nécessité de n'employer que des granulats donnant la garantie de dureté et de pureté.

Les graves :

Les graves malaxées avec un certain pourcentage du ciment (3 à 6% selon la destination du matériau) constituent une sorte de béton maigre appelé grave-ciment.

On les utilise comme :

- Couche de base de chaussée noire ;
- Couche de fondation de chaussée en béton de ciment ;

- Sous couche pour sols d'usine, cours bétonnées, parking, trottoir, pistes, etc.

1-14 Propreté des granulats :

Tous les granulats contiennent une quantité, plus ou moins grande d'impuretés.

Les impuretés ont un caractère en commun : ils influent négativement sur les qualités essentielles du béton (résistance, imperméabilité...).

Cependant on peut les classer en deux catégories :

- Impuretés prohibées : on cite les particules de charbon, de bois, d'argile, de micas. la norme **NFP 18-540** limite les impuretés à 1,5% et pour les fines de concassage est de 3%.
- Impureté tolérées :
Parmi lesquelles on peut citer : Les éléments très fins, les matières Organiques, sulfates.....

1-2 Les matériaux pouzzolaniques : [18]

Il est depuis longtemps connu que certains matériaux possèdent la propriété de réagir à température ordinaire avec la chaux hydratée pour former des composés à caractère hydraulique. Ils sont appelés pouzzolanes et sont constitués principalement par de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer.

L'emploi des matériaux pulvérulents en mélange avec la chaux grasse pour obtenir des mortiers durcissant au contact de l'eau remonte à la plus haute antiquité. Au VII^e siècle avant j.c., les grecs utilisaient déjà ce que l'on appelle aujourd'hui la terre de Santorin (de l'île du même nom) pour fabriquer des mortiers dont ils enduisaient l'intérieur des citernes. Les constructions romaines, aussi bien aériennes que maritimes étaient exécutées à partir de la cendre volcanique du Vésuve.

On appelait cette cendre « Pulvis puteolanus » parce qu'elle provenait de la région située de la ville de Pouzzoles.

En Italie, le terme de pouzzolane s'applique au début aux matériaux volcaniques de Vésuve. Il s'étendait par la suite aux roches volcaniques italiennes en général. Actuellement, on englobe sous cette dénomination un grand nombre de roches siliceuses, volcanique ou sédimentaires, telle que par exemple la terre de Santorin, les trass allemands ou romains, les tufs américains et la gaize française.

Outre ces matériaux dont le caractère pouzzolanique se manifeste à l'état naturel, il en existe d'autre dont ce caractère ne ressort qu'après un traitement approprié, en général thermique, comme par exemple les argiles.

L'étude des phénomènes chimico-physiques se déroulant entre la chaux et la pouzzolane remonte au début de siècle passé et a occupé un grand nombre des chercheurs. Les théories élaborées pour expliquer l'activité pouzzolanique contiennent encore de nombreuses lacunes dues à la complexité d'une part de ces substances entrant en réaction et d'autre part des produits sortants de réaction.

1-2-1 Activité pouzzolanique : [18]

Pour présenter une activité pouzzolanique, un matériau siliceux ou alumineux doit se trouver dans un état particulier de structure correspondant à un état amorphe ou cryptocristalline. Les pouzzolanes naturelles remplissent cette condition sans subir de traitement préalable. Les matériaux argileux n'acquièrent des propriétés pouzzolaniques qu'après un traitement, en particulier thermique, qui transforme les phases montmorillonite, Kaolinite et Illite en une phase amorphe aux rayons X. L'alumine des bauxites doit se trouver sous forme intermédiaire entre la phase hydraté et le corindon.

Le domaine de température du traitement thermique des argiles se situe entre la déshydratation à 600-800 °C. (Effet endothermique) et la recristallisation vers 1000°C. (Effet exothermique). Pour l'alumine hydratée, ce domaine se situe entre l'effet endothermique de déshydratation vers 600°C. Et l'effet exothermique de recristallisation en corindon vers 1050°C.

L'amélioration de l'activité pouzzolanique par traitement thermique des pouzzolanes naturelles repose en grande partie sur la dégradation des phases argileuses qui constituent les impuretés.

La détermination de la quantité d'eau de constitution ne fournit pas un critère de l'activité pouzzolanique. La détermination de la perte au feu servant à caractériser les trass allemands ne peut servir qu'à cette classe de matériaux et peut même conduire pour celle-ci à des conclusions erronées si, par hasard, il apparaît des substances argileuses en proportions variables.

Il n'y a pas de relation entre la surface spécifique déterminée par adsorption de chaux et de l'activité pouzzolanique manifestée par la résistance à la compression. Ainsi, pour les argiles qui possèdent elles-mêmes une activité superficielle (capacité d'échange d'ions) très variable suivant la nature du minéral argileux et la teneur en celui-ci, l'activité pouzzolanique repose non seulement sur un effet physique de surface, mis encore sur une réaction chimique.

L'étude du fractionnement granulométriques, soit d'une pouzzolane naturelle, soit d'une pouzzolane artificielle, a permis de mettre en évidence le fait que l'activité pouzzolanique est la plus élevée pour les fractions les plus fines.

Cela résulte d'une part de la grande finesse et d'autre part de l'enrichissement de ces fractions en minéraux pouzzolaniques actifs ou susceptibles d'être activés.

Les argiles de types montmorillonite, Kaolinite et illite et les bauxites sont susceptibles de présenter, après une activation thermique, une activité pouzzolanique égale ou même supérieure à celles des pouzzolanes naturelles ; En outre, les résistances mécaniques des mortiers de 65% de ciment portland no et 35% de pouzzolanes peuvent atteindre celles de ciment portland normal et dans certains cas même les dépasser. Les temps de prise demeurent du même ordre de grandeur que ceux du ciment portland normal, sauf si la pouzzolane contient de l'alumine sous forme d'oxyde libre (cas des bauxites, diminution du temps de prise). Par leurs propriétés de réagir avec la chaux et la magnésie, les pouzzolanes sont particulièrement indiquées avec les

ciments à haute teneur en CaO libre et en MgO pour en diminuer le défaut d'expansion.

Ainsi, les pouzzolanes se trouvent être une source très intéressante, au point de vue industriel, de matériaux à caractère hydraulique.

1-3-Les ciments : [2]

Définition :

Les ciments, encore appelés liants hydrauliques, sont des poudres fines chimiques constituées de silicates et d'aluminium de chaux qui s'hydratent en présence d'eau pour donner naissance à un matériau solide, qui conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

1-3-1 Constituants principaux et additions :

Constitutions du clinker :

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

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_3S) (50-70% du clinker)
- Le silicate bicalcique $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_2S) (10-30% du clinker)
- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) (2-15% du clinker)
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique)
 $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) (5-15% du clinker).

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O , K_2O), de la magnésie (MgO), diverses traces de métaux.

La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci.

Les autres constituants des ciments :

Le ciment portant est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les autres constituants associés au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques.

Les constituants les plus utilisés sont :

Calcaires :

Les calcaires sont considérés comme un des constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate CaCO_3 supérieure à 75% en masse.

Laitier granulé de haut fourneau :

Le laitier est un sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

Cendres volantes (V ou W) :

Elles sont les produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques.

Schistes calcinés :

Ce sont des schistes que l'on porte à une température d'environ 800°C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.

Fumée de silice :

Les fumées de silices sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de $0,1 \mu\text{m}$). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent être présentes pour au moins 85 % (en masse). Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques.

Fillers :

Ce sont des « constituants secondaires » des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5% en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

1-3-2 Prise et durcissement du ciment :

Le mécanisme de durcissement du ciment est très différent de celui de la chaux. Le ciment durcit par hydratation des silicates et des aluminates de chaux, alors que la chaux durcit lentement à l'air en se carbonatant.

La chaux est obtenue par cuisson du calcaire CO_3Ca , qui, vers 400°C , perd son gaz carbonique et se transforme en chaux vive, CaO . Celle-ci doit d'abord être éteinte avec de l'eau, ce qui la transforme en chaux hydratée, $\text{Ca}(\text{OH})_2$; cette dernière réabsorbe alors lentement le gaz carbonique de l'air et reconstitue progressivement un calcaire tendre.

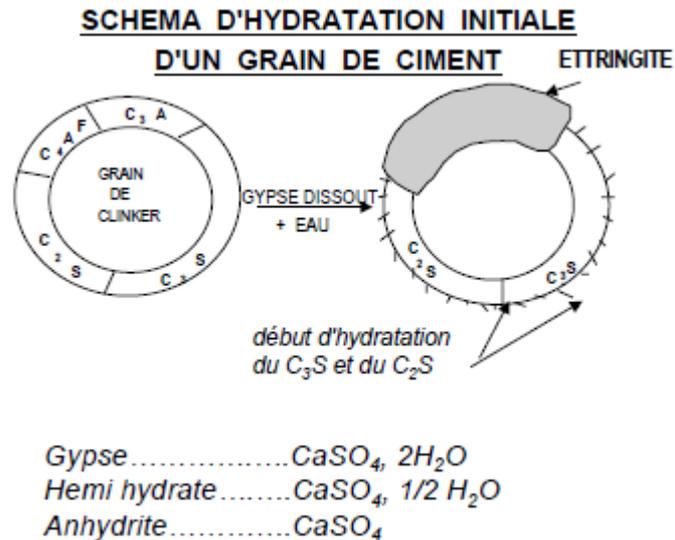
Le ciment portland contient quatre constituants : le silicate tricalcique « $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ » ou, par abréviation, C_3S ; silicate bi calcique « $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ » ou C_2S ; l'aluminate tricalcique « $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ » ou C_3A ; le Ferro-aluminate tétra calcique « $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{FeO}_3$ » ou C_4AF .

L'élément noble du ciment est le silicate tricalcique, qui lui donne ses fortes résistances. La proportion de silicate tricalcique dans le ciment portland, qui était de 50% avant guerre, s'est progressivement accrue jusqu'à 60%, et atteint même actuellement 70% dans certains ciments très résistants.

Par hydratation, les silicates tri et bi calciques donnent du silicate mono calcique hydraté et dégagent de la chaux libre hydratée. Ce sont les cristaux de silicates mono calcique hydraté qui, en se fixant entre eux et aux granulats, confèrent au ciment sa résistance.

L'aluminate tricalcique donne, par hydratation, de l'aluminate mono calcique hydraté et dégage de la chaux libre hydratée. C'est aussi un élément actif de la résistance des ciments ; il contribue notamment beaucoup, par la rapidité relative de sa réaction, aux résistances dans les

premiers temps. C'est également la première cristallisation du trisulfo-aluminates (ou ettringite) produite par hydratation de C_3A en présence de gypse, ainsi que des réactions physico-chimiques complexes qui sont à l'origine du raidissement de la pâte de ciment : ce qu'on appelle la prise du ciment (entre 1h 30 et 6 h après le malaxage)



1-3-3 Principe de fabrication :

Le ciment Portland artificiel, le CPA, résulte du broyage du clinker avec environ 5% de gypse pour réguler la prise. Le clinker est une roche artificielle obtenue par cuisson à $1450^{\circ}C$, constitue le plus souvent d'un mélange de calcaire (environ 80%) et d'argile (20%) ou de matériaux apportant la silice, l'alumine et le fer. Les clinkers peuvent être très différents les uns des autres du fait de la composition du cru, du mode de cuisson et du refroidissement. C'est-à-dire qu'en les broyant à des finesses variées avec des teneurs en gypse plus ou moins importantes, on obtiendra des ciments Portland artificiels n'ayant pas les mêmes caractéristiques.

On fabrique des ciments encore plus variés grâce à l'ajout de constituants secondaires tels que les laitiers de haut fourneau (L), les cendres volantes (C), les pouzzolanes (Z), et la fumée de silice (D).

1-3-4 Procédés de fabrication du ciment :

Procédé par voie humide :

Les matériaux sont délayés avec de l'eau de façon à obtenir une pâte fluide (28 à 35% d'eau) ayant une composition chimique convenable et qui sert à alimenter des fours rotatifs. Un four moyen de 150 mètres de long, 4 mètres de diamètre permet une production de 1000 tonnes/jours. Les plus grands en service ont des diamètres de 6 à 7 mètres, des longueurs de 230 mètres et peuvent produire près de 4000 tonnes de clinker par jour. Le clinker est refroidi vers 1000°C dans des appareils spéciaux est stocké dans des halls.

C'est le procédé le plus ancien mais il n'est pas économique car il consomme énormément d'énergie (de l'ordre de 1250 à 1400 kcal par kg de clinker produit). Ce procédé tend pratiquement à disparaître actuellement.

Procédé par voie semi-humide :

C'est une variante du procédé par voie humide, la pâte est essorée par des filtres presses, boudinée, déshydratée, décarbonatée, avant d'être cuite dans les fours rotatifs courts.

Procédés par voie sèche :

Les roches sont concassées, échantillonnées, déversées dans des halls de prés-homogénéisation de façon à reconstituer une « carrière artificielle ». Elles sont reprises afin d'être transformées en poudre sèche dans des broyeurs sécheurs puis parfaitement homogénéisées par le procédé de fluidification. La poudre obtenue passe ensuite dans des fours le plus souvent constitués de deux parties : une partie verticale (préchauffer) où

elle se décarbonate et arrive ainsi vers 1000°C dans un four rotatif court (60 à 80 mètres de longueur).

Un four de 4 mètre de diamètre et 70 mètres de longueur a une production de 2500 tonnes/jours. Il existe des fours capables de produire jusqu'à 8000 tonnes de clinker par jour. Ce procédé est économique et consomme de l'ordre de 800 à 900 kcal/kg de clinker ; soit environ 40% de moins que le procédé par voie humide.

Procédé par voie semi-sèche :

Il constitue une variante de la voie sèche. La poudre est agglomérée avec de l'eau pour former des granulats qui passent d'abord sur une grille de décarnisation. On peut, avec ce procédé, utiliser des fours droits.

1-3-5 Broyage et conditionnement du clinker :

Le clinker refroidi, le gypse et éventuellement les constituants secondaires passent dans des broyeurs à boulets qui sont des cylindres rotatifs en acier de 2 à 4 mètres de diamètre et de 8 à 12 mètres de long. Ils fonctionnent soit en circuit ouvert (passage direct de la matière) ; soit en circuit fermé (le ciment est envoyé dans des séparateurs, les gros revenant dans une des chambres du broyeur).

Tableau 1-3: Procédés généraux de fabrication du ciment.

Opération communes aux quatre procédés Extraction en carrière : calcaire, argile, marne, Concassage, Transport.	
Voie Humide Concassage ; Délayage + Broyage ; Dosage ; Stockage ; Four. Voie semi-humide Filtration ; Boudinage ; Four.	Voie sèche Pré-homogénéisation ; Broyage-Séchage ; Homogénéisation ; Four. Voie semi-sèche Granulation ; Four.
Opérations communes aux quatre procédés Broyage ; Gypse + constituants secondaires éventuelles (laitier, cendres, etc.) ; Stockage ; Expédition (en sacs ou en vrac).	

1-3-6 Classification normalisées des ciments :

La classification des ciments est faite de deux manières : soit d'après leur composition chimique, soit d'après leur classe de résistance.

a) Classification d'après la composition :

Les ciments courants sont classés, en fonction de leurs compositions minéralogiques, en quatre catégories :

Ciment portland :

La famille des ciments Portland comporte principalement :

- Le ciment Portland artificiel [CPA] : c'est un ciment constitué de 95 % à 100 % de clinker et de 0 à 5 % de constituants secondaires.
- Le ciment Portland composé [C.P.J] : c'est un ciment contenant au moins 65% de clinker, le reste étant l'un ou plusieurs de constituants secondaires suivant : laitier, pouzzolane, cendre et filler.

Ciment de haut fourneau (CHF)

Les ciments de haut fourneau sont constitués d'un mélange de clinker et de laitier de haut fourneau granulé et broyé. Il existe trois classes de ciment de haut fourneau, ces classes sont nommées ciment de haut fourneau désignées par : CHF-CEM III/A, CHF-CEM III/B, et CHF-CEM III/C.

Tous ces ciments peuvent comporter jusqu'à 5% de filler, mais la différence est dans la proposition de laitier de haut fourneau granulé broyé.

Ces proportions sont les suivants :

Tableau 1-4 : teneur en laitier dans les ciments de haut fourneau.

Classe du ciment	Pourcentage du laitier
CHF - CEM III/A	36 ÷ 65
CHF - CEM III/B	66 ÷ 80
CHF - CEM III/C	81 ÷ 95

Ciment pouzzolanique :

Il existe deux classes de ciment pouzzolanique :

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

Le ciment pouzzolanique présente une faible résistance à 7 jours (de l'ordre de 12 MPa), et à 28 jours (≈ 22.5 MPa). Mais c'est un ciment à faible chaleur d'hydratation, et présente une certaine résistance aux attaques par les sulfates et les acides.

Ciment au laitier et aux cendres :

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

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

Les ciments courants, présentés précédemment, doivent avoir une composition minéralogique conforme aux normes indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 1-5: Classification normalisées des ciments.

Désignation	Notation	Clinker (%)	Constituants secondaires %
Ciment Portland	CPA - CEM 1	95 - 100	0 - 5
Ciment composé	CPJ - CEM II/A	80 - 94	0 - 5
	CPJ - CEM II/B	65 - 79	
Ciment haut fourneau	CLH - CEM III/A	35 - 64	0 - 5
	CLH - CEM III/B	20 - 34	0 - 5
	CLK - CEM III/C	5 - 19	0 - 5
Ciment pouzzolanique	CPZ - CEM IV/A	65 - 90	0 - 5
	CPZ - CEM IV/B	45 - 64	0 - 5
Ciment au laitier et cendres	CLC - CEM V/A	40 - 64	0 - 5
	CLC - CEM V/B	20 - 39	0 - 5

b) Classification des ciments d'après leur classe de résistance :

Outre leur composition, les ciments peuvent être également classés selon leur résistance nominale, ou classe. Cette classe est déterminée conformément à la norme NA 234.

Cette norme distingue trois classes de résistance des ciments, exprimées en (N/mm²), et qui sont les suivants :

$$\text{Classe de Résistance (MPa)} = \left[\begin{array}{l} \text{Classe I} = 32,5 \\ \text{Classe II} = 42,5 \\ \text{Classe III} = 55 \end{array} \right]$$

Spécification chimiques :

Concernant les spécifications chimiques des ciments (perte au feu, teneur en oxyde de magnésium, etc.), elles doivent être conformes aux valeurs réglementaires illustrés dans le tableau suivant

Tableau 1-6 : Limites tolérables.

Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Exigence (%)
Perte au feu	CPA - CEM I	Toutes classes	≤ 5.0
	CHF - CEM III		
	CLK - CEM III		
Oxyde de magnésium	CPA - CEM I	Toutes classes	≤ 5.0
Résidu insoluble	CPA - CEM I	Toutes classes	≤ 5.0
	CHF - CEM III		
	CLK - CEM III		
Sulfate (SO ₃)	CPA – CEM I	32,5	$\leq 3,5$
	CPJ – CEM II	32,5 R	
	CPZ – CEM IV	42,5	$\leq 4,0$
	CPA – CEM V	52,5 52,5 R	
CHF – CEM III	Toutes classes		
Chlorures	Tous types	Touts classes sauf 52,5 R	$\leq 0,10$
		52,5 R	$\leq 0,05 \leq$
Pouzzolanité	CPZ – CEM IV	Toutes classes	Satisfait à l'essai

Ciments spéciaux:

Devant la demande de plus en plus accrue, et devant la diversité de la demande, les fabricants ont élaborés différents types de ciments plus spécifiques les uns des autres, (ciment de laitier à la chaux, ciment à maçonner, ciment prompt naturel, ciment alumineux fondu...).

1-4 Eau de gâchage : [1], [2]

L'eau de gâchage est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de béton. C'est d'elle que dépendent en grande partie la cohésion et la résistance de ce matériau de construction omniprésent. Grâce à l'eau de gâchage, le mélange de béton frais peut être mis en œuvre avec une ouvrabilité contrôlée.

Cette eau est d'une grande importance, elle est soumise à certaines exigences et a même fait l'objet d'une norme (**NFP 18-303**).

Les principaux modes d'action des impuretés des eaux de gâchage :

Le tableau 1-7 résume les principales impuretés rencontrées dans les eaux. Les actions qu'elles sont susceptibles de générer si les conditions de concentration sont adéquates. Ces actions peuvent s'analyser selon trois types :

- Des actions de corrosion des armatures du béton.
- Des actions négatives sur la compacité ou la liaison pâte-granulat.
- Des interactions chimiques avec l'hydratation du ciment qui conduisent soit à une modification de la prise, soit à une réduction des résistances, soit à des réactions de destruction (long terme).

Tableau 1-7 : principale impureté dans les eaux.

Composants	Types d'action à craindre
Sulfates	<ul style="list-style-type: none"> • En faible proportion : peut modifier la prise et le durcissement. • En forte proportion : il y'a réaction avec le ciment accompagnée de gonflement préjudiciable à la durabilité du béton.
Chlorure	<ul style="list-style-type: none"> • En faible proportion : accélération de la prise avec le ciment • En forte proportion : corrosion des armatures du béton
H ⁺ OH ⁻	<ul style="list-style-type: none"> • LE PH faible n'est dangereux qu'à cause des précautions d'emploi qu'il impose. • Les sels de sodium (NaOH) ou de potassium (KOH) sont de puissants accélérateurs, mais ils réduisent les résistances à 28 jours.
Na ⁺	<ul style="list-style-type: none"> • Les sels de sodium et de potassium sont en général très solubles et donc très courant dans les eaux. • En forte proportion, ils peuvent être à l'origine de réaction alcaline avec les granulats.
Les huiles	<ul style="list-style-type: none"> • En forte proportion, elles réduisent la bonne liaison pâte- granulat et font chuter les résistances.
Les sucres	<ul style="list-style-type: none"> • Réagissent avec le ciment pour donner des sels de calcium. • En faible quantité : ce sont de puissants retardateurs. • En plus forte quantité : ce sont des inhibiteurs de durcissement

1-5 Les adjuvants : [1]**Définition :**

Les adjuvants sont des produits (liquides ou poudres) qui ajoutés au béton en faible quantité (moins de 5%) permettent d'améliorer certaines propriétés maniabilité et imperméabilité, ou qualités : compacité et résistance au gel, souhaitées soit sur béton frais soit sur béton durci. Les adjuvants sont toujours incorporés dans la masse du béton frais.

Le mode d'action des adjuvants est :

- Soit mécanique : en modifiant la consistance du mélange.
- Soit physique : en agissant sur la tension superficielle des composants.
- Soit chimique : en modifiant la vitesse de prise et la réaction d'hydratation du ciment.

En général, chaque adjuvant a une action principale qui définit et d'après laquelle il est classé. Cependant il peut présenter d'autres actions secondaires.

- **Les fluidifiants (ou réducteurs d'eau) :**

Rôle :

- Améliorant la plasticité et l'ouvrabilité des bétons.
- Permettent de diminuer la quantité d'eau de gâchage, donc d'augmenter la résistance.

Mode d'action :

- Diminuent la tension à l'interface entre l'eau et les particules ce qui facilite le mouillage des grains par l'eau.
- Diminuent les forces d'attraction entre les particules, produisent une défloculation de celles-ci et réduisent donc le seuil de cisaillement.

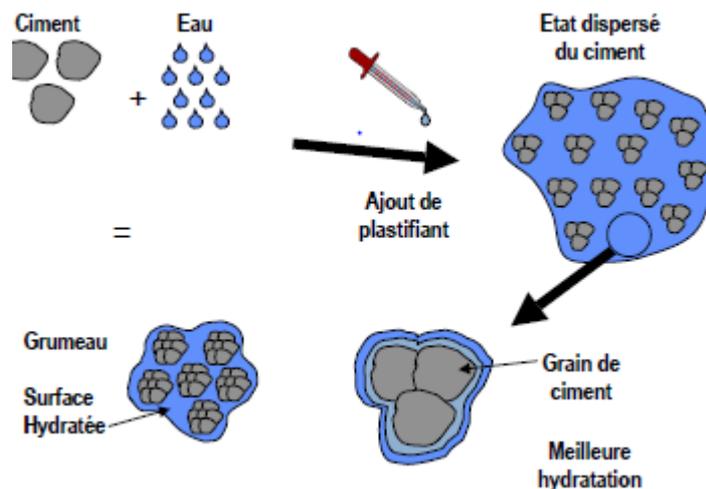


Figure 1-1 : l'adjuvant : plastifiant réducteur d'eau.

Composition :

Ce type de fluidifiant se présente sous forme d'un produit liquide soluble dans l'eau. On l'emploie donc incorporé à l'eau de gâchage en fonction du poids du ciment ce qui permet une diminution d'eau/m³ de béton.

Si l'adjuvant entraîne de l'air, celui-ci diminue la résistance. La performance exigée sur la résistance implique, à la fois, une réduction du dosage en eau et un entrainement d'air réduit.

- Les stabilisateurs :

Ce sont des produits pulvérulents extrêmement fins. Les stabilisateurs améliorent la cohésion interne du béton frais. Cette cohésion interne d'un mélange de béton frais est augmentée par un nombre important de fines ayant une grande surface spécifique.

Les stabilisateurs pour béton pompé sont appelés « agents de pompage ».

Rôle :

- Améliorant la stabilité et l'homogénéité en diminuant le ressuage et en augmentant la cohésion.
- L'augmentation de la cohésion améliore la rétention de l'eau, minimise le ressuage et les ajouts se sédimentent moins, surtout dans le béton léger et le béton auto nivelant (Self Compacting Concrete, SCC). Le béton pompé transporté « déchire » moins dans le tuyau de pompage.

Mode d'action :

- Ils agissent mécaniquement produits fins qui complètent la granulométrie du béton.

Composition :

On peut citer : la bentonite, le kieselgur, les pouzzolanes broyées.

Les stabilisateurs de cohésion sont généralement utilisés conjointement avec des superfluidifiants.

- **Accélérateurs de prise :**

Ce sont des produits solubles dans l'eau. Ils agissent chimiquement en modifiant les vitesses de dissolution des constituants anhydres et en accélérant l'hydratation des grains de ciment. La prise est alors plus rapide et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important.

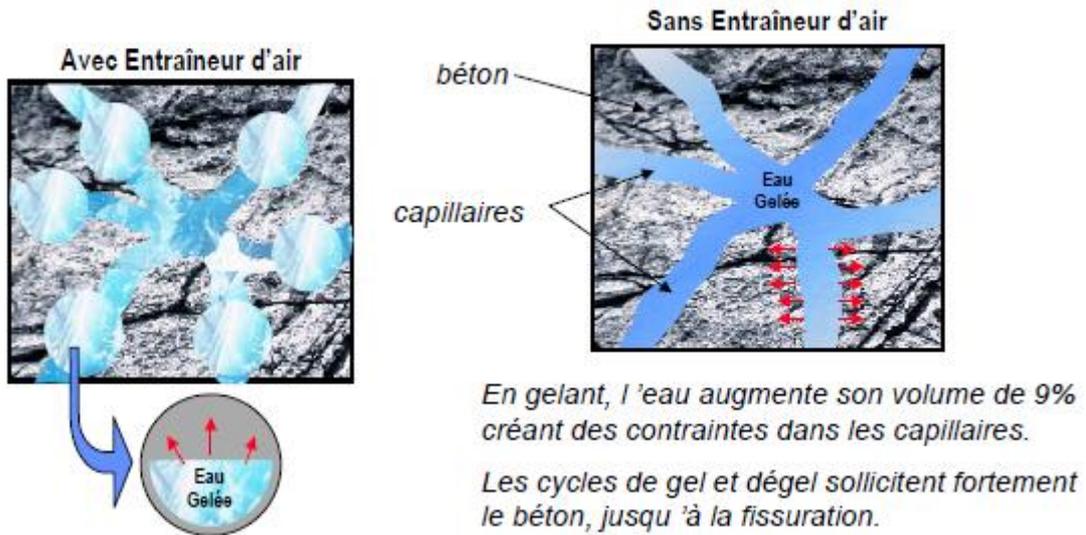
En général, les accélérateurs sont employés pour les bétonnages par temps froid ou lorsque un durcissement rapide est souhaité.

Ils augmentent le retrait, diminuent légèrement les résistances finales et accélèrent la corrosion des aciers (surtout CaCl_2 interdit en précontraint).

- *Domaines d'applications :*
 - ✓ *bétonnage par temps froid*
 - ✓ *béton manufacturé (blocs, pavés, tuyaux ...)*
 - ✓ *besoin d'augmentation de productivité : BPE ou PREFA*
 - ✓ *décoffrage rapide*
 - ✓ *bétons à hautes résistances initiales*
 - ✓ *...*



Les entraîneurs d'air : qui confèrent au béton durci la capacité de résister aux effets de gels et de dégels successifs en favorisant la formation de micro bulle d'air répartir de façon homogène.



Principe de fonctionnement pour la résistance au gel :

2-1 Les granulats :**Echantillonnage :**

Les essais sur les diverses propriétés des granulats sont effectués sur des échantillons du matériau et, de ce fait que, les résultats ne sont valables, d'une certaine manière, que pour les granulats de l'échantillon. Etant donné que l'on s'intéresse à la masse totale des granulats fournis ou disponibles, on doit s'assurer que l'échantillon prélevé est représentatif de l'ensemble. Un tel échantillon est donc dit représentatif et certaines précautions doivent être observées lors de l'échantillonnage pour qu'il en soit ainsi.

2-1-1 Prélèvement sur le tas :

Lorsqu'un matériau est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres. On prélèvera donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon ainsi représentatif que possible de l'ensemble, ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

2-1-2 Echantillonnage au laboratoire :

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage.

Quartage : [4]

L'échantillon est divisé en quatre parties égales, dont on ne retient que la moitié en réunissant deux parties opposées.

- Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué, l'opération pouvant se répéter trois ou quatre fois. On obtient ainsi un échantillon représentatif du matériau initial.

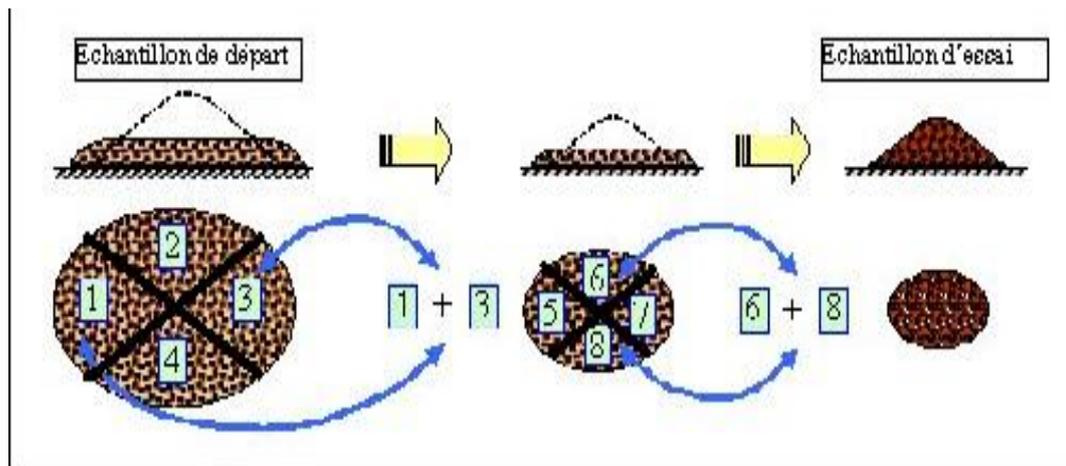


Figure 2-1 : Opération de quartage.

2-2 Analyse granulométrique : (NF P 18-560)

Définition :

L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions. L'analyse granulométrique complète comprend en générale deux opérations.

Le tamisage : pour la distribution pondérale des particules de dimension supérieures ou égales à 80 microns.

La sédimentation : pour la distribution pondérale des particules de dimension inférieures à 80 microns.

But de l'analyse granulométrique :

- Détermination de la grosseur et le pourcentage en poids de différentes formes de granulats consistants les échantillons.
- Trace la courbe granulométrique.

Remarque :

A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

Principes de l'essai :

L'essai consiste à fonctionner au moyen d'une série de tamis et passoires emboîtés les uns sur les autres reposant sur un fond de tamis un matériau en plusieurs classes de tailles décroissantes.

Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtiens par vibration de la colonne de tamis.

Equipement utilisé :

Ce sont des tamis qui sont constitués d'un maillage métallique définissant des trous carrés de dimensions normalisées.

La dimension des tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture du carré. Elles vont de 0.08 à 80 mm.

Il est également, conseillé, dans la mesure du possible, d'utiliser une machine à tamiser électriques, ce qui permet des résultats plus fiable.



Figure 2-2 : Colonnes de tamis.

Sable		Gravier	
Maille tamis	Module	Diamètre (mm)	module
0.08	20	6.3	39
0.1	21	8.0	40
0.125	22	10	41
0.16	23	12.5	42
0.2	24	16	43
0.25	25	20	44
0.315	26	25	45
0.4	27	31.5	46
0.5	28	40	47
0.63	29	50	48
0.8	30	63	49
1.00	31	80	50
1.25	32		
1.6	33		
2.00	34		
2.50	35		
3.15	36		
4.00	37		
5.00	38		

Tableau 2-1 : correspondance entre module et maille.

Dimensions des tamis utilisés :

- Pour le sable on a utilisé des tamis d'ouverture :(4-2-1-0.5-0.25-0.125-0.04) mm
- Pour les gravillons 3/8 on a utilisé des tamis d'ouverture :(10-8-6.3-5-4-3.15) mm
- Pour les gravillons 8/15 on a utilisé des tamis d'ouverture :(16-14-10-6.3-4-3.15) mm
- Pour les gravillons 15/25 on a utilisé les tamis d'ouverture :(25-20-16-14-10) mm

Mode opératoire :

- On prend une quantité représentative d'un échantillon de sol sec, la masse de l'échantillon à analyser dépend des dimensions et du pourcentage des

éléments les plus gros que cet échantillon contient. Il est recommandé de se tenir dans les limites définies par la formule suivante :

$$200 < M < 600 D$$

Avec : **M** : La masse de l'échantillon exprimée en grammes.

D : La dimension maximum exprimée en mm des plus gros éléments c.-à-d. le coté de la plus petite maille a travers de laquelle passant les plus gros éléments.

- Après le séchage de l'échantillon on pèsera celui-ci à 0.1 g.
- On choisit une série de tamis d'ouvertures décroissantes de haut vers le bas tel que le tamis supérieur de cette colonne laisse passer les plus grosses particules. On disposera sous le dernier tamis un bac destiné à recevoir les particules dont les dimensions sont supérieures à la plus petite maille de la colonne.
- Le matériau est versé en haut de la colonne.
- Un couvercle ferme l'ensemble et permet d'éviter toute perte durant le tamisage.
- On effectue la vibration manuellement.

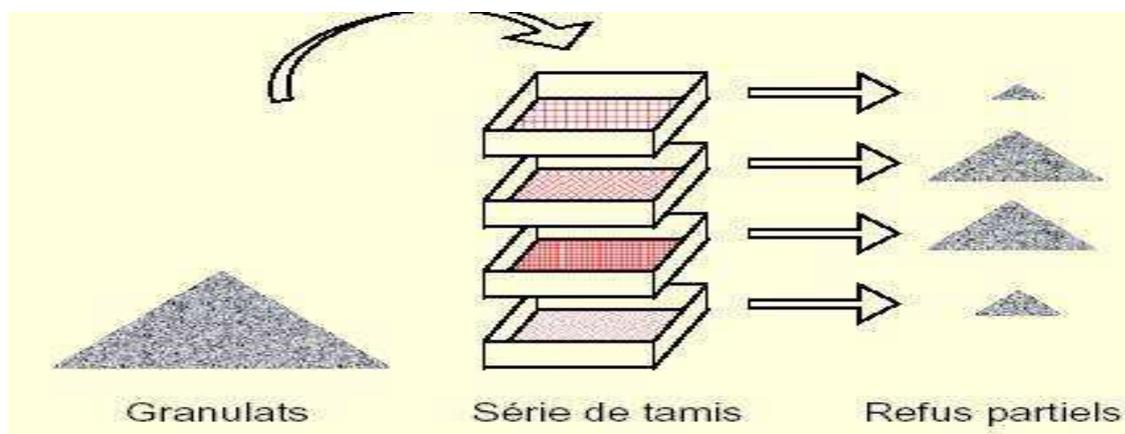


Figure 2-3 : opération de l'analyse granulométrique.

Remarque :

- On appelle refus la masse de matériel retenu par un tamis.
- On appelle tamisât la masse de matériau passante par ce même tamis.

Le refus du tamis le plus grand est pesé ; on appelle R1.

Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent on l'appelle R2.

- L'opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes, y compris le tamisât contenu dans le fond étanche. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés à tous les niveaux de la colonne.
- La somme des refus cumulés doit être égale au poids de l'échantillon introduit en tête de colonne. les pertes acceptables durant l'essai ne doivent pas dépasser 2% du poids total de l'échantillon.

Préparation de l'échantillon :

Selon la norme [NFP 18-560], la prise de l'échantillon se fait par quartage, le poids du matériau utilisé est de telle sorte que : $P \geq 0.2 D$.

Sachant que : P : poids de l'échantillon en Kg.

D : diamètre de plus grand granulat.

C'est-à-dire : sable 0/3..... $P \geq 0.2 (3) = 0.6$ Kg.

Prenant le poids de sable en son état humide naturel.

Le matériau pesé, est lavé sur le tamis de 0.08 mm séché à l'étuve pendant 24 heures à une température de 105°.

- **Sable 0/3 mm :**

le diamètre de plus gros granulat «D» concernant le sable de carrière est de 3 mm, d'où la masse de l'échantillon soumise à l'essai doit être supérieur ou égale à 0.2D.

$M \geq 0.2 (3) = 0.6$ Kg.

La masse précise de cette essai est $M = 2 \text{ Kg} = 2000 \text{ g}$.

Poids de l'échantillon (g)	Tamis (mm)	Poids des refus partiel (g)	Poids des refus cumulés (g)	Refus cumulé en %	Tamisât cumulés en %
2000	4	40	40	2	98
	2	320	360	18	82
	1	502	862	43.1	56.9
	0.5	386	1248	62.4	37.6
	0.25	394	1642	82.1	17.9
	0.125	226	1868	93.4	6.6
	0.04	124	1992	99.6	0.4
	Fond	8	2000	100	0

Tableau 2-2 : analyse granulométrique du sable 0/3 mm.

Analyse granulométrique des gravillons :

- Préparation de l'échantillon :

La prise de l'échantillon se fait par quartage, en utilisant des gravillons 3/8, 8/15 et 15/25.

Les poids des matériaux utilisés sont les suivants :

Gravillons 3 / 8 $P \geq 0.2 * (8) = 1.6$ Kg.

Gravillons 8 / 15..... $P \geq 0.2 * (15) = 3$ Kg.

Gravillons 15 / 25 $P \geq 0.2 * (25) = 5$ Kg.

Les résultats des analyses granulométriques sont représentés dans les tableaux suivants :

Poids de l'échantillon (g)	Tamis (mm)	Poids des refus partiels (g)	Poids des refus cumulés (g)	Refus cumulés en %	Tamisât cumulés en %
2600	10	53	53	2	98
	8	429	482	18	82
	6.3	805	1287	49	51
	5	733	2020	77	23
	4	417	2437	94	6
	3.15	89	2526	97	3

Tableau 2-3 : analyse granulométrique des gravillons 3/8 mm.

Poids de l'échantillon (g)	Tamis (mm)	Poids des refus partiels (g)	Poids des refus cumulés (g)	Refus cumulés en %	Tamisât cumulés en %
4760	16	100	100	2	98
	14	860	960	20	80
	10	2260	3220	67	33
	6.3	1160	4380	92	8
	4	185	4565	96	4
	3.15	56	4621	97	3

Tableau 2-4 : analyse granulométrique des gravillons 8/15 mm.

Poids de l'échantillon (g)	Tamis (mm)	Poids des refus partiels (g)	Poids des refus cumulés (g)	Refus cumulés en %	Tamisât cumulés en %
7000	25	54	54	1	99
	20	1652	1706	25	75
	16	3252	4961	71	29
	14	1246	6207	89	11
	10	710	6917	99	1

Tableau 2-5 : analyse granulométrique des gravillons 15/25 mm.

Poids de l'échantillon (g)	Tamis (mm)	Poids des refus partiels (g)	Poids des refus cumulés (g)	Refus cumulés en %	Tamisât cumulés en %
2740	10	25	25	1	98
	8	215	240	9	82
	6.3	987	1227	45	51
	5	819	2046	75	23
	4	611	2657	97	6
	3.15	78	2735	100	3

Tableau 2-6 : analyse granulométrique des F.B.B 3/8 mm.

Expression des résultats [courbes granulométriques] :

- Les pourcentages des tamisât cumulés sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrique en portant les ouvertures des tamis en abscisse sur une échelle logarithmique et les pourcentages en ordonnée sur une échelle arithmétique.
- Les représentations graphiques des analyses granulométriques des tableaux [2-2, 2-3,2-4 ,2-5,2-6] sont données par les figures [2-4,2-5,2-6,2-7,2-8].
- courbes granulométriques sont continues car, tous les tamis enregistrent un refus.

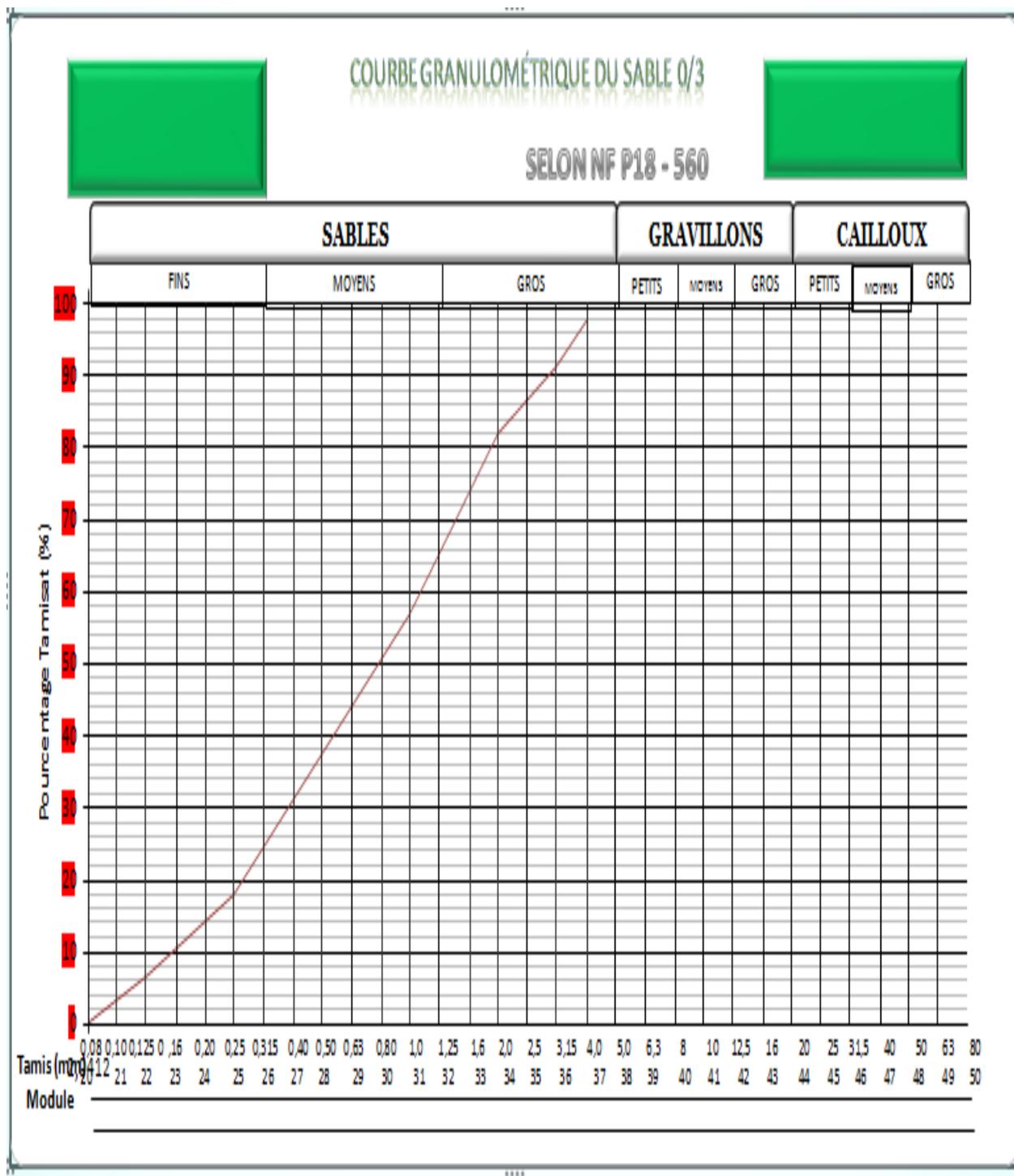


Figure 2-4 : courbe granulométrique du sable 0/3 mm.

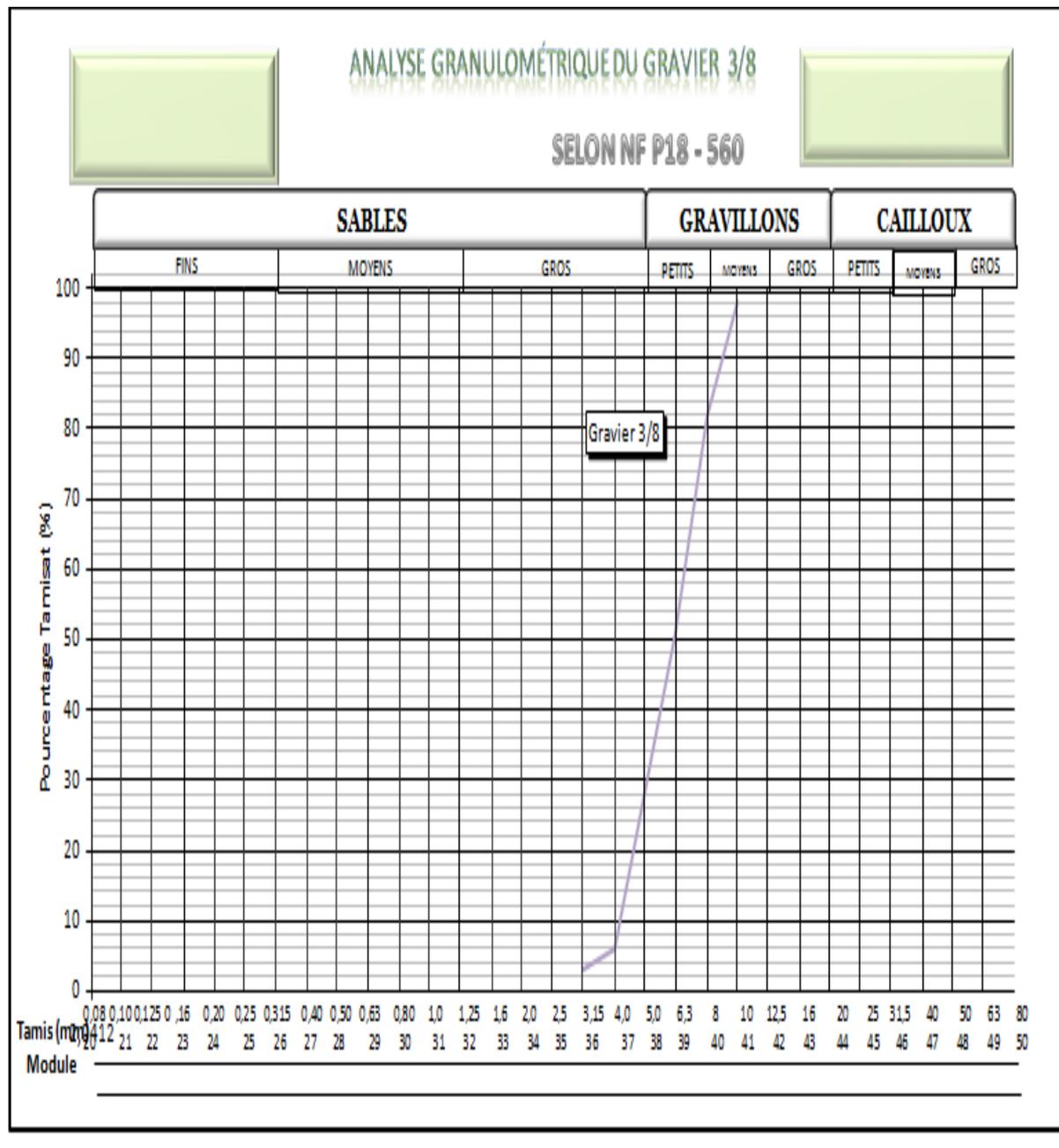


Figure 2-5 : courbe granulométrique du gravillon 3/8 mm.

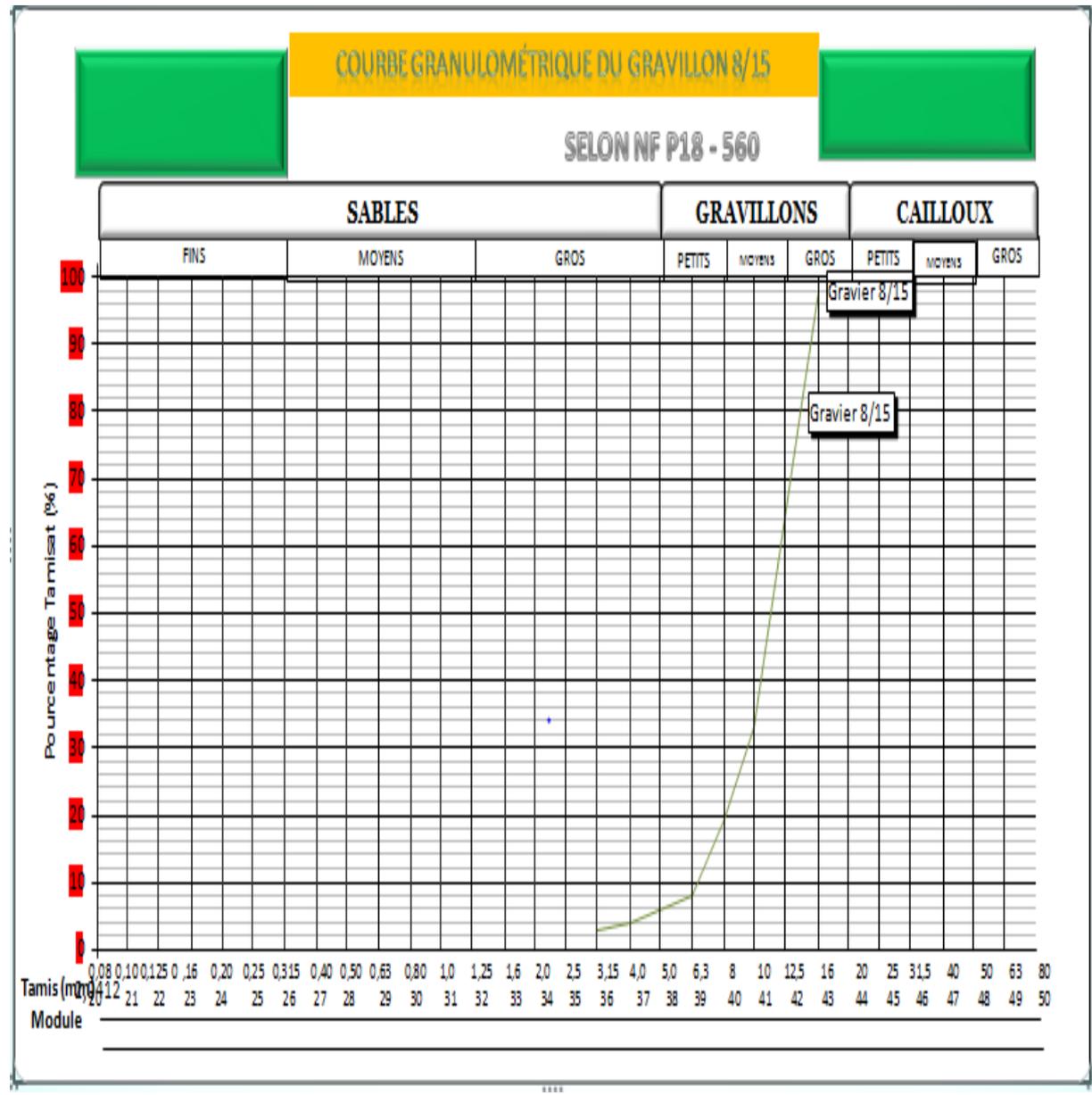


Figure 2-6 : courbe granulométrique du gravillon 8/15 mm.

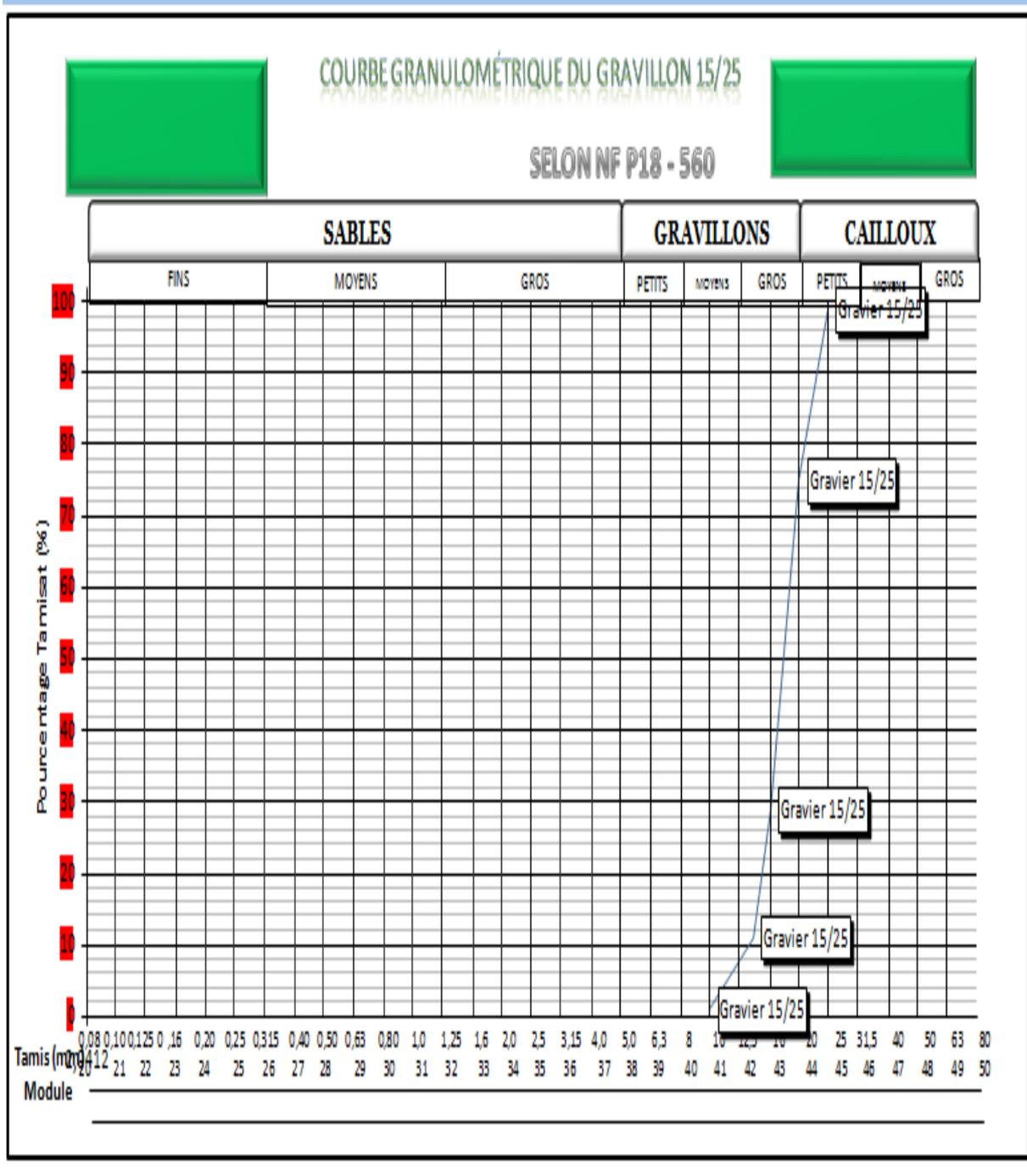


Figure 2-7 : courbe granulométrique du gravillon 15/25 mm.

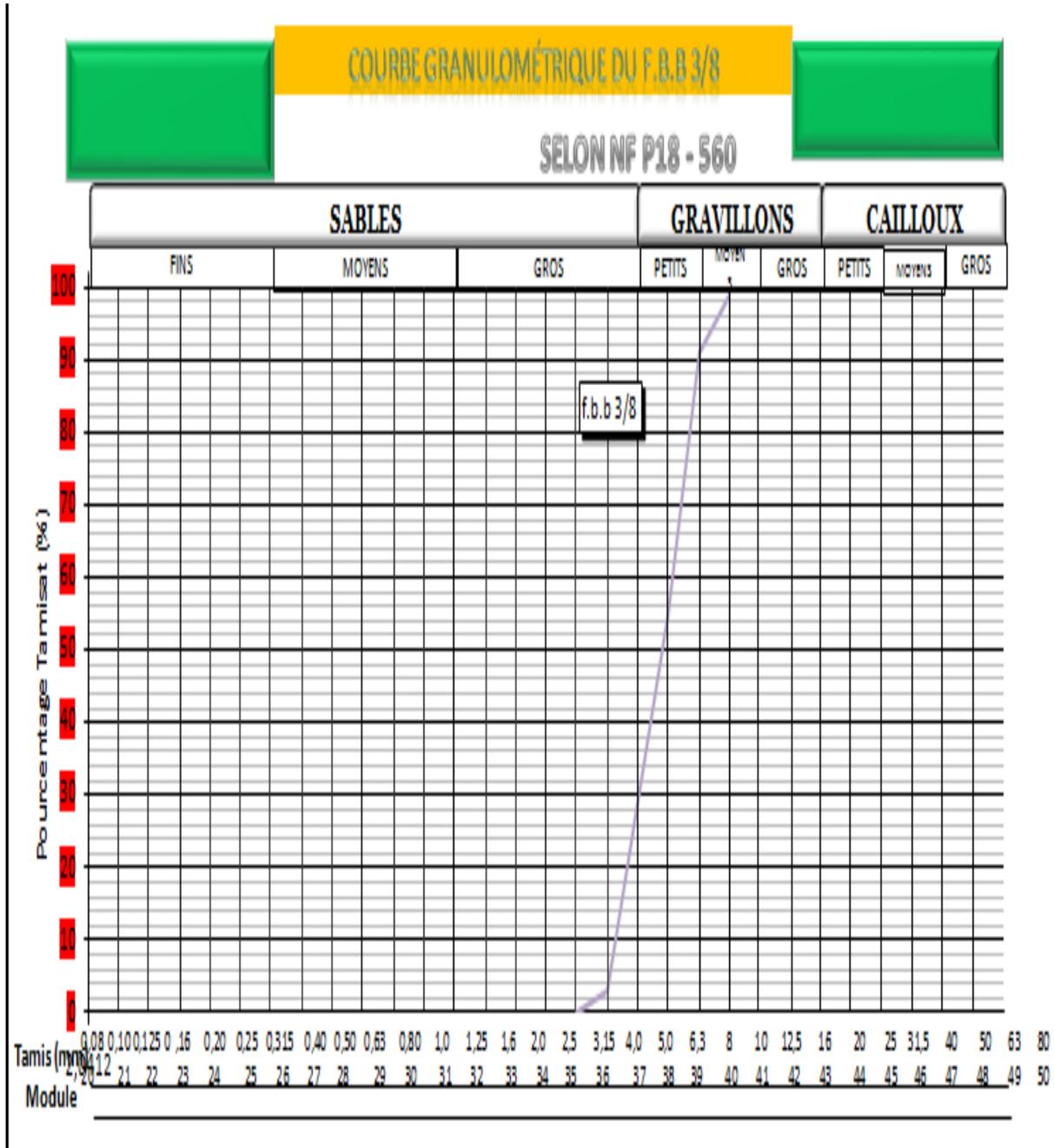


Figure 2-8 : courbe granulométrique du F.B.B 3/8 mm.

Module de finesse :

C'est le centième de la somme des refus (exprimés en pourcentages de poids aux tamis de : (0.16 – 0.315 – 0.63 - 1.25 – 2.5 – 5 – 10 – 20 – 40 – 80) mm

Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons.

En pratique il est d'usage de tester les masses suivantes :

- 2000 grammes pour un sable ;
- 5000 grammes pour petit gravier ;
- 10000 grammes pour gros gravier ;
- 20000 grammes pour un caillou.

Dans notre cas on a utilisé la série de tamis suivant : 0.25 ; 0.5 ; 1 ; 2 ; 3.15 ; 4.

Pour le sable 0/3 :

$$Mf = (82.1 + 62.4 + 43.1 + 18 + 2) / 100 = 2.076$$

$Mf = 2.076$

Interprétation des résultats :

Module de finesse : article 10,2.2 :

Catégorie	Mf	
	Mf_A	L_i
Mf_B	L_s	E0.7
Mf_C	E0.7	
Mf_D	E0.8	

Tableau 2-7 : module de finesse. [5]

L_i : limite inférieure du module de finesse qui égale à 1.8.

L_s : limite supérieure du module de finesse qui égale à 3.2.

Le sable 0/3 de carrière, il est classé en catégorie :

Mf_A , vu que son module de finesse est compris entre : $L_i = 1.8$ et $L_s = 3.2$

2-3 Mesure de la propreté des granulats :**2-3-1 Calcul de la teneur en impuretés (NF P18 - 591)****Cas des graviers :**

L'essai de propreté des graviers consiste à déterminer le pourcentage d'élément de taille inférieur à 0.5 mm. Le principe général consiste à faire débarrasser le gravier de cette classe fine uniquement par un lavage répété.

La procédure à suivre est la suivante :

- On prend dans un récipient une certaine quantité représentative de matériau, on la dessèche à l'étuve à 105°C, et on pèse, soit un poids P_1 .
- On lave à grande eau (au jet), et on maintient cette opération jusqu'à ce que l'eau de lavage devienne totalement claire, on sèche de nouveau le gravier lavé et on pèse, soit un poids P_2 .

Expression des résultats :

Le pourcentage des impuretés se déduit de l'expression suivante :

$$\text{Pourcentage d'impureté} = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_2} \right) \%$$

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

Résultats obtenus pour le gravier 3/8 :

Concernant la masse de l'échantillon prise pour cette essai et : $300 * D$

D'où $P_1 = 300 * 8 = 2400$ g.

Masse totale humide P_1 en (g)	Masse totale sèche P_2 en (g)	Teneur en impureté : P (%)
2402	2345	2.43
2402	2352	2.12
Teneur en impureté P. moyenne = 2.27		

Tableau 2-8 : teneur en impureté du gravier 3/8 mm.

Résultats obtenus pour le gravier 8/15 :

$$P_1 = 300 * 15 = 4500 \text{ g.}$$

Masse totale humide P ₁ en Kg	Masse totale sèche P ₂ en Kg	Teneur en impureté : (%)
4500 g	4430	1.58
4500 g	4437	1.41
Teneur en impureté P. moyenne = 1.495		

Tableau 2-9 : teneur en impureté du gravier 8 / 15 mm.**Résultats obtenus pour le gravier 15 / 25 :**

Concernant la masse initiale de l'échantillon prise pour cet essai et 300*D.

$$D'où \quad P_1 = 300 * 25 = 7500 \text{ g.}$$

Masse totale humide P ₁ en (g)	Masse totale sèche P ₂ en (g)	Teneur en impureté : (%)
7500	7420	1.07
7500	7417	1.11
Teneur en impureté P. moyenne = 1.09		

Tableau 2-10 : teneur en impureté du gravier 15/25 mm.**Interprétation des résultats :**

Le pourcentage d'impuretés est limité selon la réglementation en vigueur à 1.5%.pour les graviers concassés, on tolère un pourcentage en fine de 3%.

D'après les résultats obtenus, on a :

$$P\% \text{ de gravier } 3/8 = 2.27 < 3\% \rightarrow 3/8 \text{ non pollué.}$$

$$P\% \text{ de gravier } 8/15 = 1.495 < 3\% \rightarrow 8/15 \text{ non pollué.}$$

$$P\% \text{ de gravier } 15/25 = 1.09 < 3\% \rightarrow 15/25 \text{ non pollué.}$$

2-3-2 Détermination de la propreté des sables :**Essai d'équivalent de sable : (NF P18-597)**

La propreté des sables est déduite à partir de l'essai dit l'équivalent de sable (ES), ces essais permettent de mesurer la propreté de matériaux fins. Ils rendent

compte de façon globale de la quantité d'éléments fins contenus dans le matériau sans aucune distinction de nature.

Définition :

L'équivalent de sable est un rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres, il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique.

L'équivalent de sable indique le degré de pollution des éléments sableux des granulats. Parmi ses nombreux domaines d'application, les plus utilisés sont :

- Choix et contrôle des sols utilisables en stabilisation mécanique.*
- Choix et contrôle des sables à béton.
- Choix et contrôle des granulats pour les enrobés hydrocarbonés les graves – ciment et les graves – laitier.

Actuellement, trois textes réglementaires décrivent cet essai :

- D'équivalent de sable (**NF P 18-598**).
- D'équivalent de sable à 10 % de fines (**NF P 18-597**).
- Evaluation des fines – équivalent de sable (**EN 933-8**).

Principe de l'essai :

-l'essai est effectué sur la fraction 0/3 mm du sable.

-l'essai consiste à plonger un échantillon de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution lavante : après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure les hauteurs suivantes :

- ❖ H_1 : sable propre + élément fins.
- ❖ H_2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est égale :

L'équivalent de sable virtuels (ESV) est défini par :

$$ESV (\%) = \left(\frac{H_2}{H_1} \right) * 100.$$

L'équivalent de sable (ES) est défini par :

$$ES (\%) = \left(\frac{H_2}{H_1} \right) * 100.$$

En fonction de la valeur obtenue, on pourra déduire à partir du tableau 2-11 la quantité du sable.



Figure 2-9 : équivalent du sable.

ESV (%)	ES (%)	Qualité de sable
ESV < 65	ES < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualités.
$65 \leq \text{ESV} < 75$	$60 \leq \text{ES} < 70$	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour béton de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 \leq \text{ESV} < 85$	$65 \leq \text{ES} \leq 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileux convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ESV ≥ 85	ES > 80	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau 2-11 : la qualité du sable en fonction de «ES». [3]

Equipements utilisés :

Le matériel est décrit dans la norme (**NFP 18-598**).

On a :

- Eprouvette en plexiglas avec (2) traits repères, et un bouchons.
- Entonnoir pour introduire de sable.
- Bonbonne de 5 litres pour la solution lavante, le typhon et un tube souple de 1.50 m.
- Tube laveur métallique plongeant.
- Machine agitatrice (ou agitation manuelle).
- Règle métallique pour la mesure des hauteurs de sable et floculat.
- Piston taré à masse coulissante de 1 Kg pour la mesure de ES.

Conduite de l'essai :

Le matériel et le sable lavé étant préparés, on effectuera les opérations suivantes :

- La solution lavante est placée dans la bonbonne de cinq litres située à un mètre au dessus du fond des éprouvettes, le dispositif siphonique est amorcé et il est relié au tube laveur.
- Pour l'étude, on utilisera deux éprouvettes propres et on fera la moyenne des deux résultats.
- Remplir les éprouvettes graduées d'eau.
- Verser la quantité de sable (environ 120 g), et laisser reposer pendant 10 minutes.
- Boucher les éprouvettes et les faire agiter 90 fois aller et retour dans le sens horizontal puis remplacer verticalement.
- Laver le sable avec une solution lavante, et laisser reposer l'ensemble pendant 20 mm.
- Mesurer la hauteur du sable propre (H_2') et la hauteur du sable propre + éléments fins (H_1).
- La mesure de (H_2'), n'est pas toujours aisée, ce qui conduit à faire la mesure la plus précise : [ES].
- Descendre lentement le piston dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, l'immobiliser, mesurer (H_2).

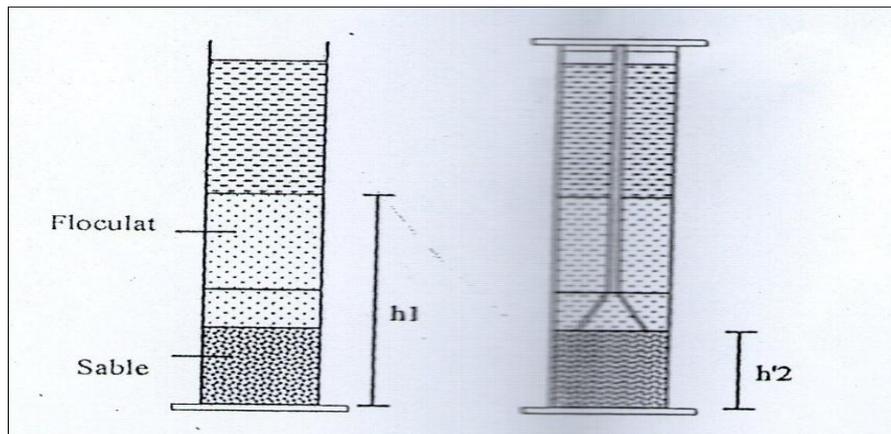


Figure 2-10 : mesure de h_1 et h_2 .

Précaution :

- Matériels très propres.
- Solution lavante de fabrication récente.
- Nettoyage des orifices de tube laveur si nécessaire.
- Aucune vibration des éprouvettes au cours de l'essai.

Expression des résultats :

N° d'essai	Masse de l'échantillon (g)	H_1	H_2	H'_2	ESV (%)	ES (%)
01	120	11.9	9.1	8.5	76.47	71.42
02	120	11.7	8.8	8.1	75.21	69.23
ES moyenne = 70.32%						

Tableau 2-12 : ES du sable de carrière.

Interprétation des résultats :

La norme **NFP 18-541** exige pour les bétons courant :

$ESV \geq 75$.

$ES \geq 70$.

Il faut retenir que plus un sable est pollué, plus son E.S est bas. Et d'après ES obtenue = 70.32% supérieure au % exigé qui est 70%, donc le sable est propre.

2-4 Détermination de masses volumiques absolues et apparentes des granulats : (NF P 18-555). [6]**Masses volumiques :**

La masse volumique d'un corps se définit comme étant le rapport de la masse d'un volume donné. Comme on distingue volume absolue et volume apparent, il faut aussi distinguer de même masse volumique absolue et masse volumique apparente.

2-4-1 Détermination de la masse volumique apparente « ρ_p » : (NF P 18-554).**Définition :**

On appelle masse volumique apparente, la masse de l'unité de volume du matériau en vrac, c'est-à-dire vides compris.

Principe de l'essai :

Il suffit de remplir un récipient, dont on connaît le volume, en prenant de grandes précautions pour éviter tous phénomènes parasites que pourrait provoquer le tassement ; en effet, un tassement trop important ou trop faible donnerait un résultat erroné. Pour limiter ce risque d'erreurs, l'essai se fera sur plusieurs pesées, avec lesquels on fera une moyenne, on pèse ensuite l'échantillon en ayant pris de déduire la masse du récipient.

En fin, la masse de l'échantillon est divisée par le volume du récipient.

Matériels utilisés :

- un récipient
- une balance
- une règle pour arasement du récipient.



Figure 2.11 : Masse volumique apparente.

Conduit de la mesure :

La mesure consiste au remplissage d'un récipient de volume intérieur connu, et à la pesée du granulat correspondant.

L'opération doit être menée comme suit :

1. Après étuvage de l'échantillon, et après quartage : le prendre entre deux mains formant un entonnoir.
2. Placer ces deux mains à 10 cm environ au dessus du récipient, laisser tomber le matériau, ni trop vite, ni trop lentement, en le disposant sans tassement par couche horizontales successives.
3. Verser ainsi le matériau, toujours au centre du récipient jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône.
4. Araser la couche supérieure du granulat à l'aide d'une réglette.
5. Peser le contenu, soit M' .

L'opération doit être effectuée trois fois pour chaque échantillon, on calcule alors la masse volumique apparente de l'échantillon

Telle que : $\rho_p = (M' - M) / V_r$

Avec :

M' : masse du récipient + échantillon

M : masse du récipient vide

V_r : volume du récipient

On a : $M = 488 \text{ g}$ $V_r = 1020 \text{ cm}^3$

Les résultats obtenus sont dans les tableaux suivants :

Type de granulat	N° de série	M' (g)	ρ_p (g/cm ³)	ρ_p moyenne
Sable 0/3	1	2010	1.492	1.507
	2	2030	1.511	
	3	2040	1.521	
Gravillon 3/8	1	1896	1.380	1.376
	2	1884	1.368	
	3	1898	1.382	
Gravillon 8/15	1	1890	1.374	1.369
	2	1880	1.364	
	3	1885	1.369	
Gravillon 15/25	1	1850	1.335	1.303
	2	1794	1.280	
	3	1808	1.294	

Tableau 2-13 : masse volumique apparentes des granulats.

- Masse volumiques apparentes des fractions 1/2 et 3/8 mm de brique broyée.

Fraction (mm)	N° de série	M (g)	ρ_p	ρ_p moyenne
1/2	1	1306	0.801	0.8
	2	1298	0.794	
	3	1314	0.809	
3/8	1	1472	0.964	0.95
	2	1446	0.939	
	3	1464	0.956	

Tableau 2-14: Masse volumiques apparentes des fractions 1/2 et 3/8 mm de brique broyée.

2-4-2 Détermination de la masse volumique absolue « ρ_s » NF P18 – 555 : [6]**Généralité :**

Le volume absolu du corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

Définition :

La masse volumique absolue « ρ_s » est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

Exprimée en t/m^3 , en kg/dm^3 ou en g/cm^3 .

La masse volumique absolue a la même valeur que la densité d'un même matériau, la seule différence étant que la densité n'a pas d'unité.

Principe de l'essai :

En partant d'une masse de granulat, et en la plongeant dans un volume d'eau V_1 , on obtiendra sa masse volumique absolue par la division de cette masse par la différence des volumes : $V_2 - V_1$

$$\rho_s = P / (V_2 - V_1) \text{ en } g/cm^3$$

Avec :

ρ_s : masse volumique absolue.

p : masse du matériau étudié (échantillon sec)

V_1 : volume d'eau.

V_2 : volume d'eau après introduction des granulats.

Matériels utilisés :

-une éprouvette graduée,

-une balance.

Méthode de l'éprouvette graduée :

Cette méthode est très simple, très rapide, et elle utilise du matériel très courant de laboratoire.



Figure 2.12 : Mesure de la masse volumique absolue.

- **Conduite de la mesure :**

1-remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.

1- Peser un échantillon sec de granulat de masse P (environ 300g), et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.

2- Le liquide monte dans l'éprouvette, lire le nouveau volume V_2 .

4-La masse volumique absolue est alors : $\rho_s = P / (V_2 - V_1)$ en g/cm^3

Cet essai est effectué trois fois pour chaque échantillon, et on prendra la moyenne.

-la masse de l'échantillon : $M = 300g$;

-le volume d'eau dans l'éprouvette : V_1 .

Les résultats obtenus sont inscrit dans les tableaux suivants :

Type de granulat	N° de série	V ₂ (cm ³)	ρ _s (g/cm ³)	ρ moyen (g/cm ³)
Sable 0/3	1	720	2.2	2.502
	2	715	2.608	
	3	725	2.4	
Gravillon 3/8	1	720	2.5	2.433
	2	725	2.4	
	3	725	2.4	
Gravillon 8/15	1	722	2.46	2.486
	2	720	2.5	
	3	720	2.5	
Gravillon 15/25	1	720	2.4	2.486
	2	720	2.4	
	3	722	2.41	

Tableau 2-15 : Masses volumiques absolues des sables et gravillons.

Fraction (mm)	N° d'essai	V ₀ (cm ³)	M (g)	V ₁ (cm ³)	V ₁ - V ₀	ρ _s	ρ _s moyen
1/2	1	250	126	310	60	2.1	2.15
	2	250	124	305	55	2.25	
	3	250	126	310	60	2.25	
3/8	1	250	128	320	70	1.82	1.83
	2	250	128	320	70	1.82	
	3	250	126	318	68	1.85	

Tableau 2-16 : masses volumiques absolues des fractions 1/2 mm et 3/8 mm de brique broyée.

Interprétation des résultats :

On constate que la brique broyée de diamètre 3/8 mm est plus légère que celle de 1/2 mm. Ceci est dû à la porosité existante dans cette brique broyée. Celle de 3/8 mm est beaucoup plus importante que celle de 1/2 mm.

2-5 Teneur en eau des granulats : [16]

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

Le tableau ci-dessous donne une idée de la quantité d'eau pouvant être absorbée par un granulat en fonction de degré de mouillage apparent :

Apparence	Teneur en eau (l/m^3)			
	Sable (0/5)	Gravier (6.3/16)	Gravier (6.3/25)	Gravier (20/40)
Sèche	10 à 20	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Humide	20 à 60	20 à 40	10 à 30	10 à 20
Très humide	80 à 100	40 à 60	30 à 50	20 à 40
saturée	120 à 140	60 à 80	50 à 70	40 à 60

Tableau 2-17 : teneur en eau approximative des granulats (l/m^3).

But de l'essai :

Cet essai a pour but de déterminer la masse d'eau interstitielle (eau située entre les grains du granulat), contenue par le granulat par rapport au matériau sec, on appelle cette valeur w .

Principe de l'essai :

Après prélèvement d'une masse d'échantillon, celle-ci sera pesée tel que, ensuite elle sera séchée et repesée ; la différence entre la masse humide et la masse sèche, le tout sera multiplié par 100 pour obtenir un %.

Matériels utilisés :

- Un four.
- Deux coupelles.
- Une balance.

Mesures et résultats :

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

$$W = \frac{\text{quantité d'eau}}{\text{quantité de granulat sec}} \%$$

Le séchage peut s'effectuer par dessiccation à l'étuve entre 100 et 110°, et ce jusqu'à masse constant.

Résultats obtenues pour les fractions 1/2 et 3/8 mm de briques broyées :

Fraction (mm)	Mh : masse de l'échantillon humide (g)	M = masse de l'échantillon sec (g)	M = Mh – Ms Poids de l'eau (g)	W (%)
1/2	144	140	4	2.85
3/8	228	224	4	1.78

Tableau 2-18 : teneur en eau des fractions 1/2 et 3/8 mm de briques Broyée.

Interprétation des résultats :

Cette teneur en eau des fractions 1/2 mm et 3/8 mm de la brique broyée représente l'eau absorbée et adsorbée.

Celle de la fraction 1/2 mm est beaucoup plus importante, la raison réside dans l'eau absorbée par les pores du grain et celle adsorbée par la plus grande surface spécifique de ce grain.

Composition chimique de la brique cuite :

Elément chimique	Teneur en %	Elément chimique	Teneur en %
SiO ₂	48.09	F	0.1
CaO	10.24	AL ₂ O ₃	16.85
MgO	1.51	FeO ₃	5.64
S	0.15	SO ₃ total	0.49
SO ₃ gypse	0.1	FeS	0.28
Na ₂ O	0.76	K ₂ O	1.85
CL ⁻	0.116	P.F	13.82

Tableau 2-19 : composition chimique de la brique broyée. [7]

Interprétation des résultats :

L'analyse chimique de la brique broyée montre une teneur en SiO₂ amorphe de 48.09 %. Cette teneur nous renseigne sur l'activité pouzzolanique de cette brique broyée.

D'après **Wesche [14]** un matériau est pouzzolanique quand le rapport CaO/SiO₂ se trouve entre [0 et 0.5]. Dans ce cas le rapport de CaO/SiO₂ = 10.24/48.09 = 0.212.

Et d'après la norme américaine **ASTM**, un matériau est considéré hautement pouzzolanique si la somme de la teneur en SiO₂+ FeO₃ + AL₂O₃ > 70.

Dans ce cas le matériau n'est pas hautement pouzzolanique car la somme de SiO₂+ FeO₃ +AL₂O₃= 53.36 <<< 70.

2-6 Caractéristiques intrinsèques des granulats :**2-6-1 Resistance au choc : essai LOS ANGELES NF P 18-573. [6]****Principe de l'essai :**

L'essai consiste à mesurer la masse m d'élément inférieur à 1.6 mm, produite par la fragmentation du matériau testé, et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine LOS ANGELES en 500 rotations pendant 15 mn.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six (06) classes granulaires suivantes :

4-6.3mm, 6.3-10 mm, 10-14mm, 10-25 mm, 16-31.5 mm, et 25-50 mm.

La masse de la charge des boulets varie suivant les classes des granulaires, comme indiqué dans le tableau suivant :

Classe granulaire (mm)	Masse de l'échantillon (g)	Masse de la charge (g)		Nombre de boulets
4-6.3	Tamis $\frac{6.3 \text{ mm}}{4 \text{ mm}}$: 5000g	3080	+20 à -150	7
6.3-10	Tamis $\frac{10 \text{ mm}}{6.3 \text{ mm}}$: 5000g	3960		9
10-14	Tamis $\frac{14 \text{ mm}}{10 \text{ mm}}$: 5000g	4840		11
10-25	Tamis $\frac{16 \text{ mm}}{10 \text{ mm}}$: 3000g et $\frac{25 \text{ mm}}{16 \text{ mm}}$: 2000g	4840	+20 à -150	11
16-31.5	Tamis $\frac{25 \text{ mm}}{16 \text{ mm}}$: 2000g et $\frac{31.5 \text{ mm}}{25 \text{ mm}}$: 3000g	5280		12
25-50	Tamis $\frac{40 \text{ mm}}{25 \text{ mm}}$: 2000g et $\frac{50 \text{ mm}}{40 \text{ mm}}$: 3000g	5280		12

Tableau 2-20 : charges des boulets.

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produite au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime la quantité : $100 \frac{m}{M}$.

Cette quantité sans dimensions est appelée par définition, coefficient LOS ANGELES du matériau (**LA**).

Appareils utilisés :

1. Tamis de ;1.6-4-6.3-10-14-16-20-25-31.5-40 et 50 mm.
2. La machine LOS ANGELES.
 - Un cylindre creux en acier de $12 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ d'épaisseur, fermé à ces deux extrémités, ayant un diamètre intérieur de $711 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ et une longueur inférieure de $508 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$.

Le cylindre est supporté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales, mais ne pénétrant pas à l'intérieur de cylindre.

3. charges de boulets :

la charge est constituée par des boulets sphériques en aciers de $47 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre, et pesant entre 420 et 445 g.

4. un moteur assurant au tambour de la machine une de rotation régulière comprise entre 30 et 33 tours/minute.
5. Un bac destiné à recueillir les matériaux après essai.
6. Un compte tours de type rotatif, arrêtant automatiquement la moteur au nombre de tours voulu.

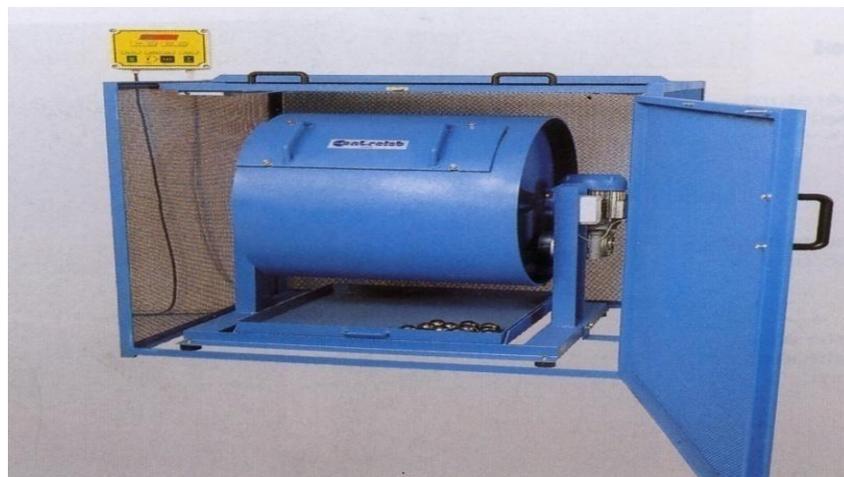


Figure 2-13 : appareil de Los Angeles.

Matériaux soumis à l'essai :**1. Prise d'échantillon :**

La masse totale de l'échantillon au laboratoire sera au moins égale à 15 kg.

2. Préparation de l'échantillon pour essai :

Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.

La masse de l'échantillon pour essai sera de 5000 ± 5 g.

Exécution de l'essai :

- Introduire avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon pour essai. La charge est fixée conformément aux indications du tableau 2-20.
- Placer le couvercle.
- Faire effectuer à la machine 500 rotations, à une vitesse régulière comprise entre 30 tr/min et 33tr/min.
- Recueillir le matériau dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- Laver le refus au tamis 1.6mm.
- Egoutter et sécher à l'étuve à 105°C. soit m' le résultat de la pesée.

Expression des résultats :

Le coefficient Los Angeles(LA) est, par définition, le rapport : $100 \frac{m}{5000}$

Où :

$m = 5000 - m'$: est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1.6mm.

$$LA = \frac{5000 - m'}{5000} * 100.$$

Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau suivant :

Nature des matériaux	Classes granulaire (mm)	Poids initial (g)	Poids final $m'(g) \geq 1.6mm$	Poids final $m = 5000 - m' < 1.6mm$	$LA = \frac{5000 - m'}{5000} \cdot 100$
15/25	10-25	5000	3584	1416	28.32
8/15	10-14	5000	3379	1621	32.42
3/8	6.3/10	5000	3212	1788	35.76

Tableau 2-21: Mesure de coefficient Los Angeles.

A partir de la norme **NF P 18-573**, on peut classer ces graviers comme suit :

Classe A : $LA < 30$

Classe B : $30 < LA < 35$

Classe C : $35 < LA < 40$

Classe D : $40 < LA < 50$

Donc :

- 3/8 en classe C
- 8/15 en classe B
- 15/25 en classe A

Les granulats étudiés ont des coefficients acceptables donc on peut les utiliser dans notre étude.

2-7 Caractéristiques intrinsèques de ciments :

2-7-1 Mesure des temps de début et de fin de prise :

Le type de ciment utilisé est le ciment portland composé CPJ 45 NA 442 fabriqué par la société d'AIN EL KEBIRA.

Objectif de l'essai :

Il est nécessaire de connaître le début et fin de prise des pâtes de ciments

(Des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront en suite confectionnés.

Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques : le début de prise à la fin de prise.

Principe de l'essai :

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée ; l'appareil utilisé est appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1.13mm de diamètre. Quand sous l'effet d'une charge de 300g l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$ on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir de début de malaxage, est appelé « TEMPS DE DEBUT DE PRISE ». Le « TEMPS DE FIN DE PRISE » est celui au bout de laquelle l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5mm.

Équipement nécessaire :

- 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, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans 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 de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une aiguille de 1.13 mm de diamètre.
- Balance précise à 0.1g près.
- Chronomètre précise à 0.1 s près.

Conduite de l'essai :

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme EN 196-3. Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée :

On préparera 2 Kg de ciment, une pâte pure de rapport $E/C = 0.26$. ceci permettra de préparer 5 moules. Pour accélérer les phénomènes, on dissoudra dans l'eau de gâchée du chlorure de calcium (CaCl_2), en prenant comme poids de CaCl_2 , 2% du poids d'eau calculée pour la gâchée. On versera l'eau avec l'accélérateur de prise dissous dans la cuve du malaxeur, contenant le ciment, on déclenchera les deux chronomètres, (un pour la gâchée, un autre pour base du temps, pour la manipulation).

La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessif. 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 platine de l'appareil de Vicat.

Quatre minute après le début de malaxage, l'aiguille est amenée 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 (10-15 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 concerné (étudié).

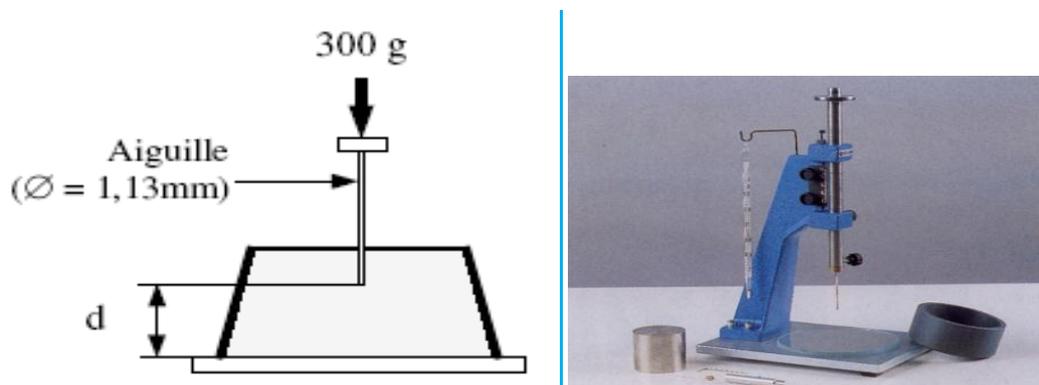


Figure 2-14 : appareil de VICAT.

Résultats obtenue :

Temps de début de prise	2 heures
Temps de fin de prise	3 heures et 24 minutes

Composition chimique de ciment :

Eléments chimiques	Teneur en %	Eléments chimiques	Teneur en %
T.100 C	0.6	MnO	0.15
SiO ₂	23.2	TiO ₂	0.29
Al ₂ O ₃	5.6	K ₂ O	0.41
Fe ₂ O ₃	3.7	Na ₂ O	0.36
CaO	66.4	SO ₃	2.1
MgO	2.0	Cl	0.011

Tableau 2-22 : composition chimique du ciment d'AIN-KEBIRA [13]

D'après les équations de Bogue on aura :

$$C_4AF = 3.04 Fe_2O_3 = 3.04 \cdot (3.7)$$

$$= 11.25\%$$

$$C_3S = 2.65 Al_2O_3 - 1.96 Fe_2O_3 = 2.65 \cdot (5.6) - 1.96 \cdot (3.7)$$

$$= 8.59\%$$

$$C_2S = 8.6 SiO_2 + 1.08 Fe_2O_3 + 5.07 Al_2O_3 - 3.07 CaO$$

$$= 8.6 \cdot (23.2) + 1.08 \cdot (3.7) + 5.07 \cdot (5.6) - 3.07 \cdot (66.4)$$

$$= 28.016\%$$

$$C_3S = 4.07 CaO - 7.06 SiO_2 - 1.43 Fe_2O_3 - 6.72 Al_2O_3$$

$$= 4.07 \cdot (66.4) - 7.06 \cdot (23.2) - 1.43 \cdot (3.7) - 6.72 \cdot (5.6)$$

$$= 51\%$$

Interprétation :

Le taux de C₃S est très élevé : le type du ciment utilisé est un ciment de résistance à court durée élevée.

2-7-2 Détermination de la stabilité par l'essai LA CHATELIER ou essai d'expansion (EN 196-3) : [8]

Conduite de l'essai :

Le mode opératoire est décrit par la norme **EN 196-3**, il faut confectionner une pâte de consistance normalisée, à l'aide d'un malaxeur normalisé ; **E/C = 0.25**, **ciment = 200g**, **eau = 50g**.

Cette pâte sera introduite dans deux (02) moles, on les posant sur une plaque en verre ; recouvrir d'une autre plaque de verre .ces moules sont conservés 24 h dans la salle ou l'armoire humide ; au bout de ce temps il convient de mesurer **A** entre les pointes des aiguilles (voir figure). après prise les moules sont alors entreposés dans le bain d'eau à 20°C qui doit être porté à ébullition en 30 mn ± 5 mn .

Soit **B** l'écartement entre les pointes des aiguilles au bout de ce temps.

Soit **C** l'écartement des aiguilles lorsque le moule, après refroidissement, est revenue à la température de 20 °C.

La stabilité est caractérisée par la valeur **C-A** exprimé en mn prés.

La stabilité est calculée par la formule suivante :

$$ST = (C - A) \pm 0.5 \text{ mm.}$$

D'après les essais effectués au laboratoire de la faculté, on a obtenu les résultats suivants :

N° du moule	Mesure N°1 : A (mm)	Mesure N°2 : B (mm)	Mesure N°3 : C (mm)	Stabilité (ST) : C-A (mm)
1	4.5	3.5	5.25	0.25
2	4	3	5	1

Tableau 2-23 résultats obtenues.

On prend la valeur moyenne des gonflements des 2 moules : $ST = 0.62 \pm 0.5 \text{ mm}$

D'après la norme, le gonflement ou l'expansion devront être inférieur à 10 mm, pour toutes les classes de ciment, et c'est le cas dans notre ciment étudié.

Interprétation des résultats :

On a obtenue une stabilité égale à 0.62 ± 0.5 mm, qui est très inférieure à 10 mm ; ce qui nous laisse dire que notre ciment est à une stabilité très acceptable .**les teneurs en CaO, MgO et SO₃** sont optimales.



Figure 2-15 : appareil de l'essai le Chatelier.

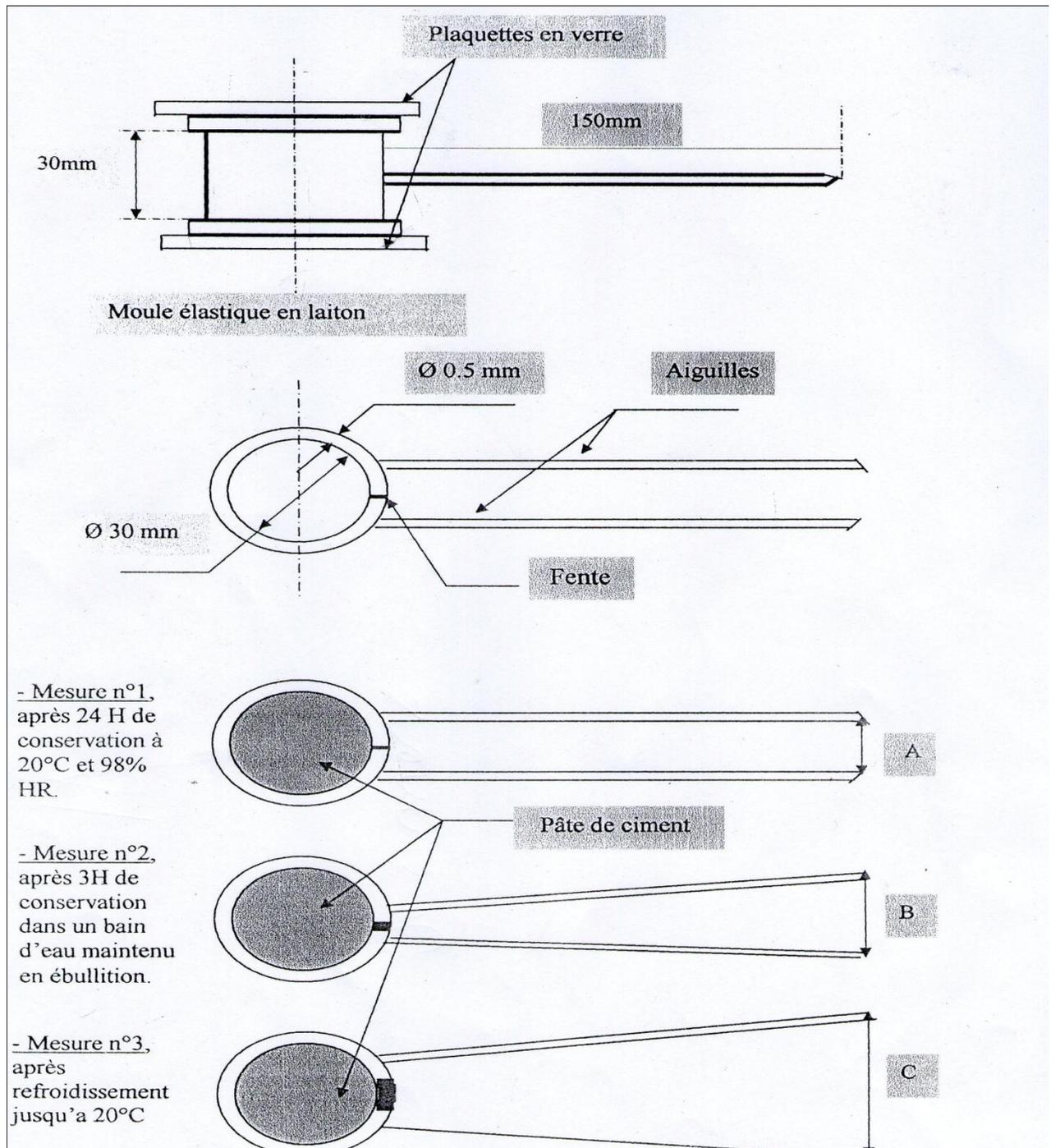


Figure 2-16 : conduite de l'essai.

3-1 Introduction :

Le béton est un matériau composite agglomère constitué de granulats durs de dimensions collées entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement un ciment portland, les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants de 1(eau) à 3(ciment) t/m³. Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, selon le liant utilisé, de béton de résine, de béton d'hydrocarboné, de béton d'argile.

Les différents granulats forment le squelette granulaire du mortier ou du béton. Le ciment, l'eau et les adjuvants forment la pâte liante. Lorsque il n'a pas de squelette granulaire, on parle de « pâte de ciment », la pâte est un élément unique et actif du béton enrobant les granulats, l'objectif est de remplir les vides existants entre les grains. La pâte joue le rôle de lubrifiant et de colle.

Dans les bétons où une très grande compacité est recherchée, la dimension des éléments les plus fins peut descendre en dessous de 0,1 mm (fillers, fumée de silice).

De même les granulats très légers ont des masses volumiques inférieures à 100 Kg/m³.

Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant, présentés dans le tableau suivant :

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (%)	14-22	1-6	7-14	60-78
Poids (%)	5-9		9-18	63-85

Tableau 3-1: la composition des constituants de béton en poids et en volume.

3-2 Classification du béton :

En général le béton peut être classé en quatre groupes, selon la masse volumique :

- Béton très lourd : $> 2500 \text{ Kg/m}^3$.
- Béton lourd (béton courant) : $1800-2500 \text{ Kg/m}^3$.
- Béton léger : $500-1800 \text{ Kg/m}^3$.
- Béton très léger : $< 500 \text{ Kg/m}^3$.

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants

- Béton de ciment (le ciment) ;
- Béton silicate (la chaux) ;
- Béton de gypse (le gypse).

Les conditions favorables pour le durcissement d'un béton :

-l'humidité

-la température supérieure à $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

-le calme pendant la période de cure (absence de sollicitation d'ordre mécanique ou physique).

Pour être durable, un béton doit :

- Etre bien composé
- Correctement mis en œuvre.
- Protégé des causes possibles d'altération par disposition constructives adéquates.

3-3 Méthodes de compositions des bétons :

Deux théories sont actuellement en présence. Celle qui préconise un béton dit continu, la courbe granulométrique du mélange ne présentant pas alors de discontinuité. Celle qui préconise un mélange dit discontinu ou l'on admet une discontinuité dans la courbe granulométrique du mélange c'est-à-dire que l'on admet l'absence d'une certaine gamme de granulats. Si nous comparons des bétons réalisés selon ces deux théories, pour un même dosage en ciment, on obtient généralement des bétons légèrement plus résistants et moins ouvrables par la théorie de la discontinuité par rapport à la théorie de la continuité et réciproquement.

3-3-1 Etude comparative des méthodes de composition :

Toutes les méthodes graphiques ou expérimentales s'accordent sur les qualités essentielles à rechercher pour un béton (bonne résistance, faible porosité, durabilité, etc.), par contre se différencient dans la procédure à suivre et les résultats qui en aboutissent.

Pour les méthodes graphiques (Bolomey, Faury, Joisel), la principale différence réside dans la définition de la courbe granulométrique de référence, selon que l'on incluse ou non le ciment dans les matières fines, pourtant, toutes ont un point commun, elles dépendent de paramètres qui sont intimement reliés aux caractéristiques morphologiques des matériaux utilisés (nature et qualité des granulats, type de liant, etc.).

Méthode Dreux-gorisse :

C'est la méthode la plus utilisée actuellement, elle est simple et pratique. Et donne d'excellents résultats.

Méthodes de Faury :

Cette méthode donne des bétons contenant moins de sable et davantage de gravier : les bétons Faury seront donc plus raides, et conviendront à des travaux pour lesquels une très bonne maniabilité n'est pas indispensable. Les bétons Faury présentent souvent une résistance mécanique supérieure à ceux préconisés par Bolomey.

Méthode de Bolomey :

Cette méthode donne généralement des bétons riches en éléments fins (sable), donc très maniables, son emploi est fréquent pour les travaux routiers, et pour les bétons devant être mis en place par pompage. Cependant elle ne tient pas compte des idées modernes sur les effets de paroi et d'interférence, et du rayon moyen de moule.

Méthode de Valette :

Cette méthode donne un bon béton, d'une grande compacité, si les matériaux utilisés sont homogènes et de caractéristiques constantes, sinon, le

béton obtenu est raide, peu maniable, difficile à mettre en place, est parfois sujette à la ségrégation.

Méthode de baron-Lesage :

C'est une excellente méthode, elle est exclusivement expérimentale, elle mesure directement l'ouvrabilité réelle du béton et permet de déduire la quantité d'eau exacte à incorporer, cependant c'est une méthode assez lourde d'utilisation, et nécessite la fabrication de plusieurs centaines de litre de béton, et elle est nettement plus coûteuse qu'une méthode graphique.

Elle est utilisable dans le cas des études régionales de composition ou lorsque le laboratoire doit contrôler un chantier et assurer le suivi en continu de la fabrication, il faut avoir les moyens de connaître le béton et les conséquences des fluctuations de dosage des constituants car dans ce cas, elle devient économique.

3-4 Principe de la formulation des bétons : [3]

L'étude de la composition d'un béton, consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment, et en eau afin de réaliser un béton présentant de bonnes caractéristiques rhéologiques telles que [ouvrabilité, maniabilité résistance à la ségrégation] à l'état frais, et les meilleurs caractéristiques à l'état durci [résistance à la compression].

Il est bon de se rappeler que l'objectif de la formulation est de confectionner le béton le plus économique, et donnant satisfaction à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

Les principales données du problème de la composition des bétons se résument à :

- La dimension maximale des granulats.
- L'ouvrabilité, qui peut être défini par la plasticité mesurée au cône d'ABRAMS.
- La résistance à la compression qui peut être défini par l'écrasement d'éprouvettes cylindriques réalisées avec le béton en question. Ce sont

d'ailleurs là, trois données qui sont à préciser lorsqu'on passe commande d'un béton à une centrale de béton prêt à l'emploi.

But de la composition des bétons :

L'étude d'une composition de béton consiste presque toujours, à rechercher conjointement deux qualités essentielles : résistance et ouvrabilité ; or ces deux qualités sont étroitement liées l'une à l'autre quant aux facteurs dont elles dépendent mais elles varient en sens inverses comme l'indique le tableau suivant :

Facteurs de composition du béton	Pour une bonne ouvrabilité	Pour une bonne résistance
Finesse du sable	Plutôt fin	Plutôt grossier
Rapport G/S (gravier/sable)	A diminuer	A augmenter
Dosage en eau	A augmenter	A diminuer
Granularité	Continue préférable	Discontinue préférable
Dimension max, des granulats	Plutôt petite	Plutôt forte

Tableau 3-2 : variation de l'ouvrabilité et de la résistance en fonction des facteurs de composition du béton. [3]

3-5 Méthode de DREUX-GORISSE : [3]

La méthode de M.dreux, est une synthèse des diverses théories existante sur la composition des bétons, appuyée sur un examen statistique de nombreux chantiers sérieusement contrôlés. Son but est de définir d'une manière simple et rapide une première formulation de béton en fonction de deux paramètres principaux du béton : résistance et ouvrabilité.

La formulation définitive étant obtenue par quelques gâchées d'essais permettant d'ajuster au mieux la formule théorique du béton en fonction des qualités désirées et des matériaux réellement employés.

Tracé la courbe granulaire de référence : « figure 3-1 »

Elle consiste à optimiser le squelette granulaire à partir d'une courbe granulaire de référence, cette dernière est définie par les trois points **O, A, B**, qui représente une ligne brisée. Cette courbe nous permet de déterminer les différents (%) des granulats entrant dans la composition des bétons.

Détermination des coordonnées des points : O, A et B :

Les coordonnées de O, A et B sont :

O (0,0)

B (D^{\max} , 100%)

A (x, y).

Point O :

-Abscisse O mm

-Ordonnée O%

Point B :

A l'ordonnée 100% correspond la dimension D du plus gros granulat.

-Abscisse 25 mm

-Ordonnée 100%

-B (25 mm, 100%).

Point A :

Représente le point de brisure et à des coordonnées bien définies :

En abscisse :

Si $D \leq 20\text{mm}$ alors : $X=D/2$

Et si $D > 20\text{mm}$ alors : la coordonnée X est située au milieu de segment délimité par le module du tamis 5mm et le module de D.

Pour l'ordonnée : Y

Il est donné par la formule suivante :

$$y = 50 - \sqrt{D} + K + Ks + Kp$$

K : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de la forme des granulats (roulée ou concassés), et de l'efficacité de serrage.

Les valeurs du coefficient (K) sont données par le tableau 3-3.

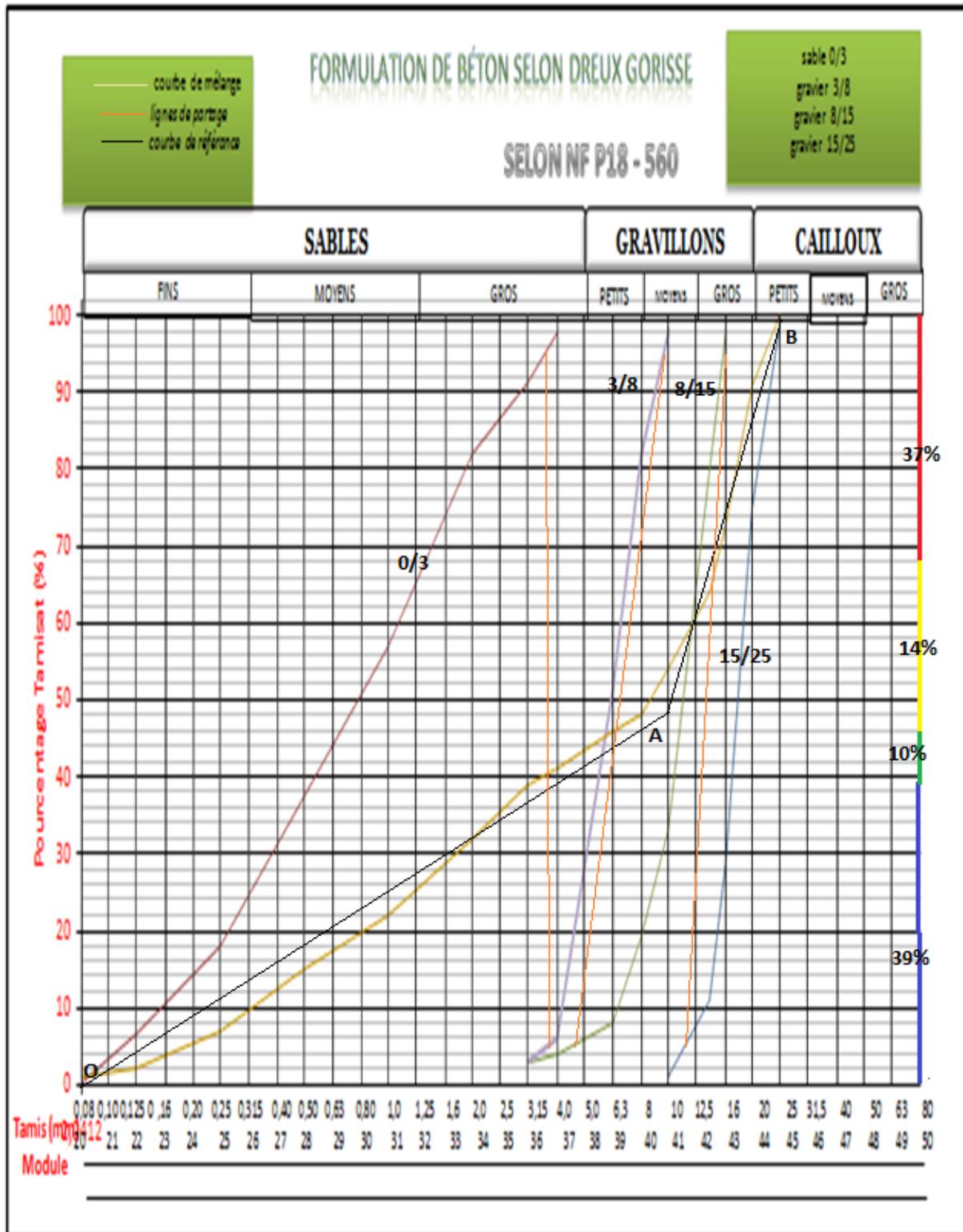


Figure 3-1 : formulation du béton ordinaire par la méthode Dreux Gorisse.

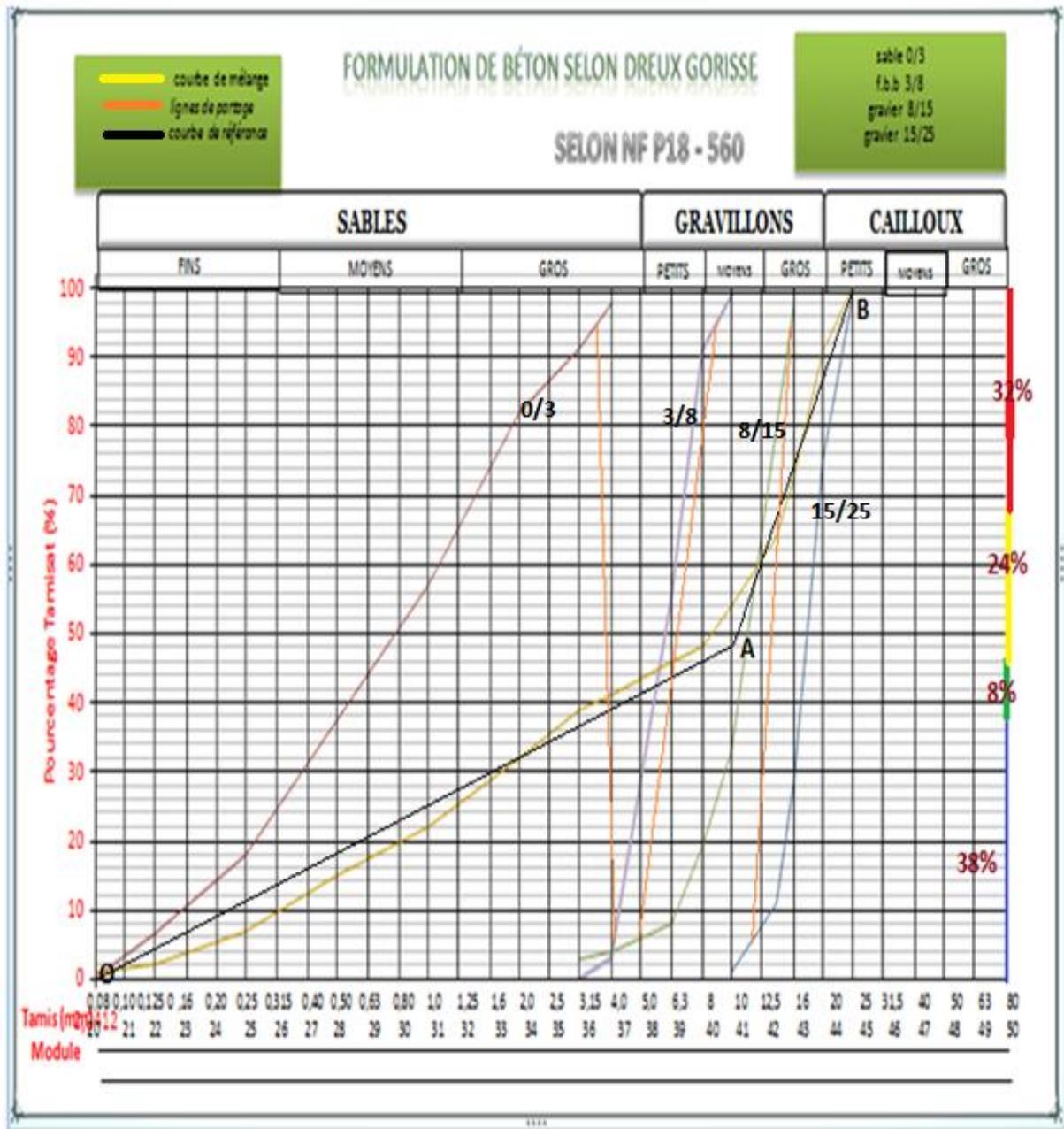


Figure 3-2 : formulation du béton avec F.B.B 3/8 mm par la méthode de Dreux Gorisse.

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
400+adj.	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	-2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Tableau 3-3 : valeurs de coefficient (K). [3]

Note :

Si le module de finesse est fort [sable grossier], une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa.

La correction supplémentaire est effectuée en ajoutant la valeur K_s telle que :

$$K_s = 6M_f - 15$$

Relation dans laquelle M_f représente le module de finesse, module qui varie entre 2 et 3 généralement.

Le coefficient K_p n'est appliqué que lorsque le béton doit présenter un maximum de plasticité, (cas des bétons pompables).

On adoptera une valeur de ce coefficient entre 5 et 10 selon la plasticité désirée.

$$AN : Y = 50 - \sqrt{25} + 2 + 2.46$$

$$Y = 49 \%$$

A (10 mm, 49%).

La courbe granulaire de référence :

La courbe granulométrique de référence sera tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats.

On trace ensuite les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe granulométrique du premier granulat au point 5% de la courbe granulométrique du second, et ainsi de suite.

On lira alors sur la courbe de référence au point d'intersection avec la ou les droites de partage en volume absolu de chacun des granulats.

Ces proportions sont données par le tableau ci-dessous :

	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
Pourcentage des constituants	39%	10%	14%	37%

Tableau 3-4: pourcentage du squelette granulaire pour béton de référence.

	Sable 0/3	F.B.B 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
Pourcentage des constituants	38%	8%	22%	32%

Tableau 3-5: pourcentage du squelette granulaire pour béton avec F.B.B 3/8 mm.

Tracé de la courbe du mélange des granulats :

La courbe du mélange est donnée à partir des valeurs des tamisats en % qui sont calculés à partir des analyses granulométriques des granulats obtenues dans le deuxième chapitre.

Tamis (mm)	Tamisats (%) S 0/3	Tamisats (%) G1 3/8	Tamisats (%) G2 8/15	Tamisats (%) G3 15/25	Tamisats(%) 0.39S+0.1G1+0.14G2+0.37G3
0.08	0.4	0	0	0	0.16
0.125	6.6	0	0	0	2.5
0.25	17.9	0	0	0	7
0.5	37.6	0	0	0	15
1	56.9	0	0	0	22
2	82	0	0	0	32
3.15	98	3	3	0	39
4	100	6	4	0	41
6.3	100	51	8	0	46
8	100	82	19.48	0	48
10	100	98	33	1	54
14	100	100	80	11	64
16	100	100	98	29	73
20	100	100	100	75	91
25	100	100	100	99	100

Tableau 3-6: valeurs des tamisats (%) de la courbe de mélange.

Interprétation :

D'après la figure [3-1], on constate que la courbe de mélange granulaire épouse en certains points la courbe de référence donc la granulométrie est bonne.

Dosage en ciment :

- Le dosage en ciment le plus courant pour un béton de qualité est en général de 350 Kg/m³.
- Nous avons opté pour une teneur en ciment de C = 350 Kg/m³.

Dosage en eau :

Connaissant le dosage en ciment $C=350 \text{ Kg/m}^3$, et en fixant l'affaissement au cône d'ABRAMS = 8 cm, et d'après la figure [3-3] on va déterminer la quantité d'eau nécessaire pour 1 m^3 de béton.

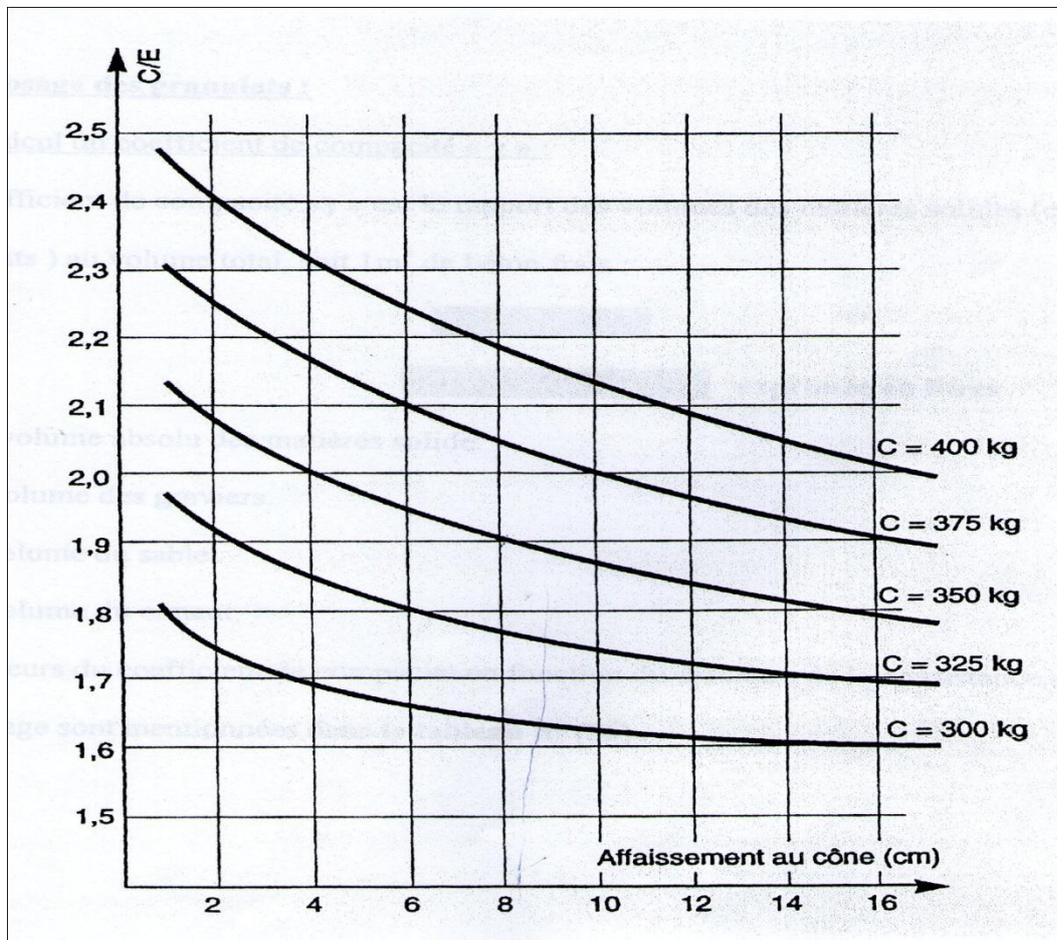


Figure 3-3 : dosage en eau.

D'après l'abaque on a :

$$C=350 \text{ Kg/m}^3$$

$$A=8 \text{ cm}$$

$$\text{Donc : } C/E = 1,9$$

$$E = C/1,9 = 350/1,9$$

$$E=184,2\text{L/m}^3$$

Donc le dosage en eau sera : $E = 184,2 \text{ L/m}^3$.

Dosage des granulats :

Calcule du coefficient de capacité « γ ».

Le coefficient de compacité « γ » est le rapport des volumes des matières solides (ciment et granulats) au volume total, soit 1 m^3 de béton frais :

$$\gamma = V_m/1000$$

$$V_m = V_g + V_s + V_c \quad \text{exprimée en litres.}$$

V_m = Volume absolu des matières solide.

V_g = volume des graviers.

V_s = Volume du sable.

V_c = Volume du ciment.

Le volume absolu de l'ensemble ciment et granulats étant donné par l'intermédiaire du coefficient de compacité.

Fonction du diamètre maximal des granulats et de plasticité désirée. Le tableau 3-7 donne la valeur du coefficient de compacité :

consistance	serrage	γ coefficient de compacité						
		$D_{\max} = 5$	$D_{\max} = 8$	$D_{\max} = 12.5$	$D_{\max} = 20$	$D_{\max} = 31.5$	$D_{\max} = 50$	$D_{\max} = 80$
molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	Vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
plastique	Piquage	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Vibration normale	0.770	0.800	0.818	0.825	0.830	0.835	0.840
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
ferme	Vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	Vibration normale	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	Vibration puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855

Nota : ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés si non il conviendra d'apporter des corrections suivantes :

Sable roulé et gravier concassé (-0.01)

Sable et gravier concassés (-0.03)

Tableau 3-7 : valeurs compacité du béton en fonction de D_{\max} de la consistance et du serrage.

- On détermine γ d'après le tableau 3-7, et cela pour un serrage normal et pour une consistance plastique.
- La valeur de γ est calculée par interpolation :

$$D = 20 \text{ mm} \quad \gamma = 0,825$$

$$D = 25 \text{ mm} \quad \gamma = x$$

$$D = 31,5 \text{ mm} \quad \gamma = 0,83$$

Donc on aura : $\gamma = 0,827$

Une correction supplémentaire est Apportée à γ , du fait que les granulats sont concassés :

$$\gamma_{\text{cos}} = \gamma - 0,03$$

$$\gamma_{\text{cos}} = 0,797.$$

Calcul des volumes des solides :

Remarque :

On va détailler le calcul pour le béton de référence et les autres calculs vont être résumés dans les tableaux ci-après.

Volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V = 1000\gamma - C$$

Volume absolu du ciment est :

$$c = C/3.1$$

C = dosage en ciment.

3,1 masses spécifiques pour les grains de ciment

$$C = 350/3.1 = 113 \text{ L.}$$

$$V = 1000 * 0.797 - 113$$

$$V = 684 \text{ litres.}$$

Alors les volumes absolus des constituants sont :

- Volume absolu de ciment 113 litres
- Volume absolu des sables 0/3684 * 0,39 = 266,8 litres

- Volume absolu des gravillons 3/8 $.684 * 0,1 = 68,41$ litres
- Volume absolu des gravillons 8/15 $684 * 0,14 = 95,77$ litres
- Volume absolu des gravillons 15/25 $.684 * 0,37 = 253,11$ litres

Total = 797 litres.

Dosage des granulats en Kg/m³ :

On obtient ces dosages : en multipliant le volume absolu par les masses volumiques absolues (ρ_s) de chaque granulat :

- Sable 0/3 $266,8 * 2,502 = 667,53$ Kg/m³
- Gravillons 3/8 $68,41 * 2,433 = 166,44$ Kg/m³
- Gravillons 8/15 $95,77 * 2,486 = 238,08$ Kg/m³
- Gravillons 15/25 $253,11 * 2,486 = 629,23$ Kg/m³

Les masses volumiques absolues sont obtenues dans le deuxième chapitre.

Influence du rapport G/S :

Ou G : représente les volumes absolus des gravillons 3/8, 8/15 et 15/25

S : représente les volumes absolus de sable.

D'après la figure 3-4 qui détermine le rapport G/S en fonction du dosage en ciment et du diamètre « D » du plus gros granulat.

Donc on aura :

$G/S > 2$ afin de garantir une bonne résistance.

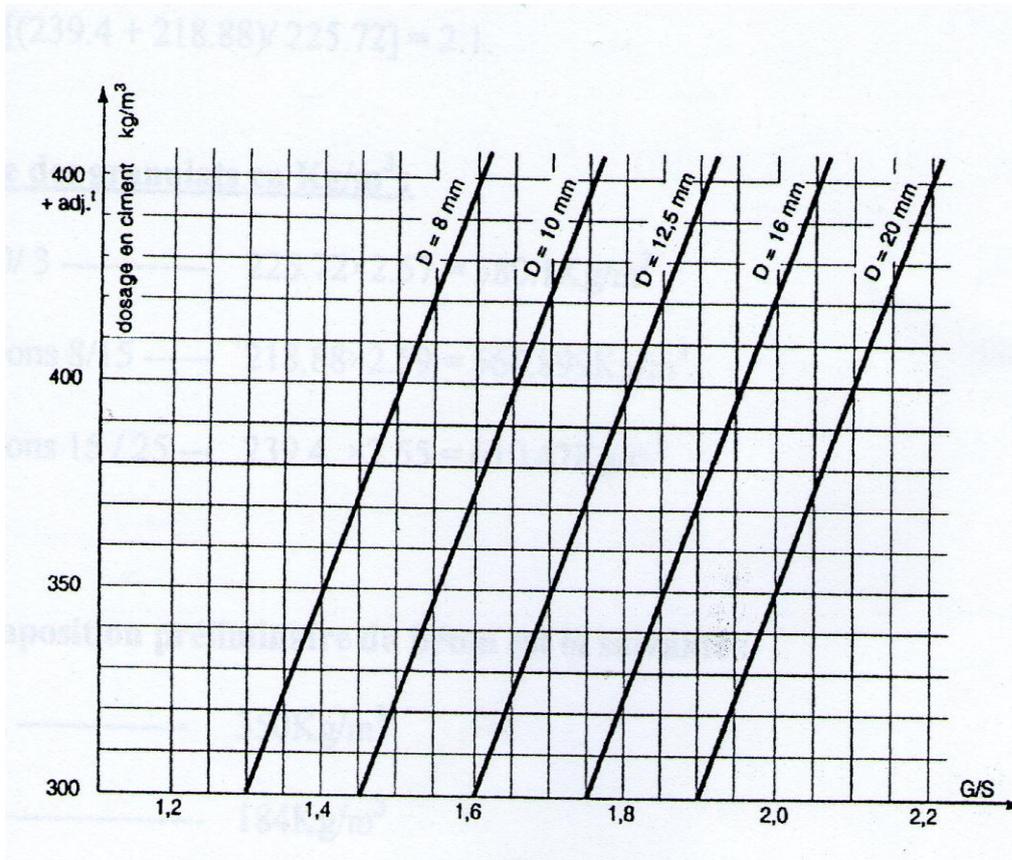


Figure 3-4 : détermination du rapport G/S.

Calcul G/S:

$$\begin{aligned}
 G/S &= [(68, 41 + 95, 77 + 253, 11)/266, 8] \\
 &= 417, 29/266,8 \\
 &= 1, 56 < 2
 \end{aligned}$$

Alors, on va modifier les % précédents afin d'avoir un rapport G/S > 2

On augmente le pourcentage des graviers 3/8 ,8/15 et on diminue celui du sable et de gravier 15/25.

On choisit les % suivants :

- Sable 0/3 33%
- Gravillons 3/814%
- Gravillons 8/1518%
- Gravillons 15/25 35%

On calculera en suite le rapport G/S :

- Sable 0/3 0,33 * 684 = 225, 753 litres.
- Gravillons 3/8 0,14 * 684 = 95, 77 litres.
- Gravillons 8/15 0,18 * 684 = 123,13 litres.
- Gravillons 15/25 0, 35 * 684 = 239, 43 litres.

Dosage des granulats en Kg /m³ :

- Sable 0/3225,753 * 2,502 = 564, 82 Kg/m³.
- Gravillon 3/8 95,77 * 2,433 = 233,00 Kg/m³.
- Gravillon 8/15123,13 *2,486 = 306,1 Kg/m³.
- Gravillon 15/25..... 239, 43 * 2,486 = 595,22 Kg/m³.

3-6 Calcul de la densité théorique du béton frais :

$$D_0 = C + P_s + P_G + E_t / (1000).$$

$$D_0 = [350 + (564.82 + 233 + 306.1 + 595.22) + 184.2] / 1000$$

$$D_0 = 2233.34 / 1000$$

$$D_0 = 2.23 \text{ g/cm}^3$$

C : dosage du ciment par m³.

P_s et P_G : les poids des sables et gravillons secs par m³.

Le tableau suivant récapitule la composition préliminaire du béton :

Composants	% des granulats	Volume des composants en litre	Dosage des composants (Kg/m ³)
Eau	-	184, 2	184,2
Ciment	-	113	350
Sable 0/3	39	225,753	564,82
Gravillon 3/8	10	95, 77	233
Gravillon 8/15	14	123, 13	306, 1
Gravillon 15/25	37	239, 43	595, 22

Tableau 3-8 : composition du béton ordinaire selon DREUX GORISS.

composants	% des granulats	Volume absolu des composants en litres	Masse volumique absolue ρ_s en g/m ³	Dosage des composants en kg/m ³
Eau	-	184.2	-	184.2
Ciment	-	113	3.1	350
Sable 0/3	33	191.82	2.502	479.18
F.B.B 3/8	22	88.92	1.83	162.72
Gravillon 8/15	10	198.36	2.486	493.12
Gravillon 15/25	35	218.8	2.486	543.93

Tableau 3-9 : composition du béton avec F.B.B 3/8 selon DREUX GORISS.

3-7 Gâchée d'essai : (N F P 18 404)

La norme distingue les essais d'études des essais de convenue :

- Les essais d'étude : sont exécutés sur un béton réalisé au laboratoire.
- Les essais de convenue : sont exécutés sur le béton gâché dans la bétonnière ou le malaxeur de chantier. Il a pour but de vérifier que les quantités de constituants prévues par m³ de béton donnent bien 1m³ de béton mis en œuvre.

3-7-1 Essai d'étude :

Sont les essais qui permettent de vérifier, au laboratoire, les qualités des bétons, notamment leur maniabilité et leur résistance et de corriger éventuellement les compositions des bétons.

La gâchée, exécutée dans le laboratoire doit permettre d'obtenir un volume de béton frais, compacté, excédent celui des éprouvettes d'au moins 25%.

Les constituants sont introduits dans la cuve l'ordre suivant : gros élément, sable, ciment et eau. L'eau sec de l'ordre de 1 mm ; le malaxage est alors poursuivi pendant deux minutes

3-7-2 Confection des éprouvettes :**Dimension des moules : (N F P 18-400)**

Les moules ont des caractéristiques définis par la norme **N F P 18-400**. Les dimensions des moules cylindriques doivent être choisies en fonction du diamètre maximal des granulats « D » entrant dans la composition du béton, comme indiqué dans le tableau 3-10.

Format	Dimensions (mm)		Section (cm ²) par un plan		D (mm) Des granulats
	Diamètre	Hauteur	Orthogonal	Diamètre	
Cylindre 11 * 22	112,8	220	100	248	≤16
Cylindre 16 * 32	159,6	320	200	511	≤40
Cylindre 25 * 50	252,5	500	500	1262	≤80

Tableau 3-10 : dimension des moules cylindriques en fonction du diamètre maximal des granulats. [10]

Dans notre travail, on utilisera des moules cylindriques de format (16 * 32) cm².
D = 16 cm ; h = 32 cm

Car le diamètre maximal des granulats est égal à 25 mm ≤ 40 mm.

- Calcul du poids total des composants de la gâchée : [3]

Sachant que pour remplir un cylindre (16 * 32) cm² de béton frais, on aura besoin d'un poids P bien défini en Kg.

$$P = V * D$$

V : volume du cylindre.

D : densité théorique.

$$P = \pi r^2 \cdot h \cdot D$$

$$P = 3.14 \cdot 8^2 \cdot 32 * 2,23/10^3$$

$$P = 14,50 \text{ Kg.}$$

On prend P = 15 Kg.

Pour 3 éprouvettes on aura :

$$P' = 3 * 15 = 45 \text{ Kg.}$$

Lors du malaxage du béton, on mesurera son affaissement au cône d'ABRAMS ainsi que le volume d'air occlus dans le béton.

Alors le poids total de la gâchée est :

$$P = 15 * 2 + 45 = 75 \text{ Kg.}$$

Ce poids total est celui de béton frais, qu'on doit obtenir à la fin de la gâchée. Il reste maintenant de déterminer le poids nécessaire pour chaque composant de ce béton, gravillons, sable, ciment et eau qui seront divisé par un coefficient ξ :

$$\xi = \text{poids total des composants par m}^3 / \text{poids total du béton frais.}$$

On a la composition de béton suivante :

- Eau 184.2 Kg/m³
- Ciment 350 Kg/m³
- Sable 0/3 564.82 Kg/m³
- Gravillons 3/8 233 Kg/m³
- Gravillons 8/15 306.1 Kg/m³
- Gravillons 15/25 595.22 Kg/m³

$$\text{Total : } P_t = 2233.34 \text{ Kg/m}^3$$

Poids total du béton utilisé = 75 Kg

$$\xi = 2233.34/75 = 29.77$$

Pour une gâchée le poids des composants serait :

- Eau $184.2/29.77 = 6.18 \text{ Kg.}$
- Ciment $350/29.77 = 11.75 \text{ Kg.}$
- Sable 0/3 $564.82/29.77 = 18.96 \text{ Kg.}$
- Gravillon 3/8 $233/29.77 = 7.82 \text{ Kg.}$
- Gravillons 8/15 $306.1/29.77 = 10.27 \text{ Kg.}$
- Gravillons 15/25 $595.22/29.77 = 19.98 \text{ Kg.}$

Composants	Poids de chaque composant en kg
Eau	6.18
Ciment	11.75
Sable 0/3	18.96
Gravillon 3/8	7.82
Gravillon 8/15	10.27
Gravillon 15/25	19.98

Tableau 3-11 : poids de chaque composant pour le béton de référence.

Composants	Poids de chaque composant en kg
Eau	6.24
Ciment	11.86
Sable 0/3	16.24
F.B.B 3/8	5.51
Gravillon 8/15	16.71
Gravillon 15/25	18.43

Tableau 3-12 : poids de chaque composant pour le béton avec F.B.B 3/8.

3-8 Propriétés du béton frais :**3-8-1 Mesure de la densité réelle du béton frais :**

Cette mesure à pour but de vérifier si avec les dosages pratiques pour la fabrication du béton on obtient bien un mètre cube de béton. La tolérance admise étant de 5%.

L'obtention d'une densité réelle supérieure à la densité théorique indique que l'on obtient moins d'un mètre cube, et le béton a un dosage en ciment plus riche que celui prévu, réciproquement lorsque la densité réelle est inférieure à la densité théorique, la composition donne plus d'un mètre cube de béton, et le béton est sous dosé en ciment. Les corrections à apporter sur la composition doivent toujours se faire sur les granulats.

L'essai est assez simple et nécessite peu de moyens, il suffit de remplir un moule de volume connu (v) dans les mêmes conditions de celle de chantier) et de le peser, soit une masse M la masse volumique se déduira alors de :

$$\text{Masse volumique du béton} = M / V$$

La masse pesée doit être assez représentative. Sur chantier il serait judicieux de profiter du coulage des cylindres destinés à la caractérisation de la résistance du béton pour faire cette essai, pour cela il suffit de peser le moule à vide, de le remplir selon les procédures habituelles, d'araser et de peser ainsi le moule rempli.

La masse volumique du béton courant dépend évidemment de la composition et des densités des constituants, et en général, elle varie dans les limites suivantes (2200/2400) Kg/m^3 .

3-8-2 Maniabilité des bétons :

Elle se mesure au moyen du cône d'ABRAMS (norme P18 – 451). On mesure de l'affaissement A , d'un troc de cône de béton après démoulage cet essai est particulièrement apte à déceler les variations de teneur en eau et déterminer l'influence des paramètres des compositions des bétons (eau, C/E, proportion des granulats, actions d'adjuvant) Sur la facilité de mise en place, c'est-à-dire la maniabilité et aussi à tester donc la consistance des bétons.

Principe de l'essai :

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids.

Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide.

Appareil utilisé :

L'appareillage utilisé est composé :

- D'un cône, dont les dimensions intérieures sont :
 $d = 100 \text{ mm}$, $D = 200 \text{ mm}$.
- D'une plaque de base ;
- D'une tige piquante en acier de 600 mm de longueur et de 16 mm de diamètre ;
- D'un portique et d'une règle pour mesurer l'affaissement
- D'une truelle pour manipuler le béton.

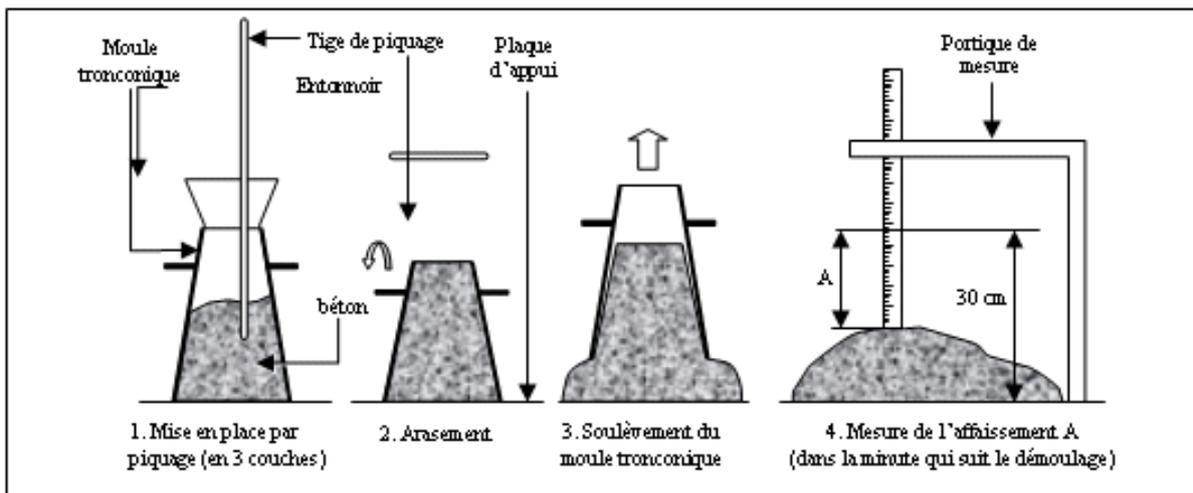


Figure 3-5 : schéma explicatif de l'essai d'affaissement.



Figure 3-6 : cône d'ABRAMS.

Mode opératoire :

- Humidifier la surface d'appui et y placer le moule tronconique
- Introduire le béton en quatre couches successives en piquant chaque couche, 25 coups à l'aide d'une barre d'acier.
- Araser à l'aide d'une truelle.
- Démouler immédiatement en soulevant le moule avec précaution.
- Attendre 1 mn et mesurer l'affaissement à l'aide d'un portique et de la règle graduée.
- Nettoyer la plaque d'appui et le moule.

Remarque :

L'essai d'affaissement au cône d'ABRAMAS (NF P 18 – 451), s'applique aux bétons, dont les granulats ont une dimension inférieure ou égale à 40 mm.

L'affaissement est mesuré par la différence de hauteur entre le moule et le niveau supérieur du béton après démoulage. Le résultat obtenu permet ainsi de classer les bétons. Cependant, il est évident qu'il ne peut concerner les bétons trop fermes dont l'affaissement n'est plus mesurable.

Le tableau suivant donne une classification des bétons et la puissance de serrage nécessaire pour les mettre en œuvre.

Mise en œuvre	Affaissement	Béton
Vibration puissante	0 – 2	Très ferme
Bonne vibration	3 – 5	Ferme
Vibration courante	6 – 9	Plastique
Piquage	10 – 13	Mou
Léger piquage	≥ 14	Liquide

Tableau 3-13: évaluation de la consistance en fonction de l'affaissement.

Classe de l'affaissement : (NF P 18-305)

Le tableau suivant, nous donne les classes d'affaissement.

Consistance	Ferme	Plastique	Tés plastique	Fluide
Affaissement en (cm)	≤ 4	5 à 9	10 à 15	≥ 16
Notation	F	P	TP	FL
	S1	S2	S3	S4

Tableau 3-14 : classe d'affaissement.

Remarque :

Les classe sont notées S_1 , S_2 , S_3 , S_4 et appelées classe d'affaissement S rappelle ici l'initiale du nom de l'essai en anglais: Slump test.

La norme NF P18 – 305 définit les même classes d'affaissement mais les note F, P, TP et FL (ferme, plastique, très plastique et fluide).

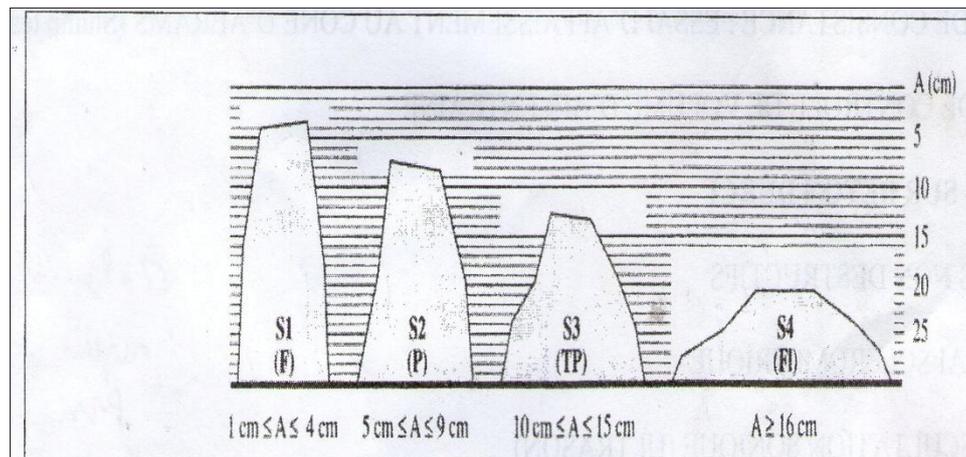


Figure 3-7 : classe d'affaissement.

L'adjuvant : plastifiant réducteur d'eau : (NA 819)

Caractéristiques physiques et chimiques :

- + solution aqueuse.
- + Densité : 1.19 ± 0.01 .
- + PH = 8/9.
- + Teneur en ions chlorure : $< 0.1\%$.
- + Teneur en Na_3O équivalent : $\leq 2.0\%$.
- + Extrait sec : $39 \pm 2.5\%$.
- + Couleur : Marron.

- Béton de référence : 1%.
- F.B.B 1/2(mm): 2%.
- F.B.B 3/8 (mm) : 2%.

1/3 d'eau dans la bétonnière.

2/3 + adjuvant pour la suite.

Composition de béton avec	Volume du plastifiant litre/m ³ de béton	Affaissement
Béton de référence	3.5	14
FBB 1/2 (mm)	7	8
FBB 3/8(mm)	7	8

Tableau 3-15 : affaissements obtenus au cône d'ABRAMS.

Interprétation des résultats :

Selon les classes d'affaissement, les bétons utilisés sont de consistance suivante :

- Béton de référence : ($10 \text{ cm} \leq A \leq 15 \text{ cm}$) → très plastique.
- F.B.B 1/2(mm): ($5 \text{ cm} \leq A \leq 9 \text{ cm}$) → plastique.
- F.B.B 3/8 (mm) : ($5 \text{ cm} \leq A \leq 9 \text{ cm}$) → plastique.

Le volume du plastifiant utilisé dans les bétons F.B.B 1/2 mm et F.B.B 3/8 mm est très important par rapport au béton de référence qui est de 3.5 l/m³. Les granulats du béton de référence sont ni absorbés ni adsorbés l'eau de gachage.

Les deux autres bétons avec les deux fractions poreuses 1/2 et 3/8 mm, le volume du plastifiant est le double du béton de référence. Cette différence nous renseigne sur l'absorption et l'adsorption de l'eau par la brique de fraction 1/2 et 3/8 mm. Il est aussi à remarquer que le l'affaissement du béton de référence est beaucoup plus important par rapport aux deux autres bétons. Les fractions poreuses ont absorbées une petite partie de l'adjuvant et diminuer leur effet sur l'ouvrabilité.

3-8-3 Essai à l'aéromètre : (NF P 18-353)

Objectif : cet essai permet d'évaluer la quantité d'air occlus dans le béton, de manière à vérifier que le minimum prévu par la norme (NF P18 – 353) en cas de gel est bien atteint.

Principe de l'essai :

On applique une pression de 1 bars, à un volume connu de béton l'air occlus étant seul à diminuer de volume sous l'effet de cette pression.

Equipement utilisé :

- Un aéromètre de capacité égale au moins à 5 litre, comprenant un bol de mesure, et un nanomètre.
- Des moyens de mise en place du béton : tige de piquage et aiguille vibrante de 25 mm de diamètre.

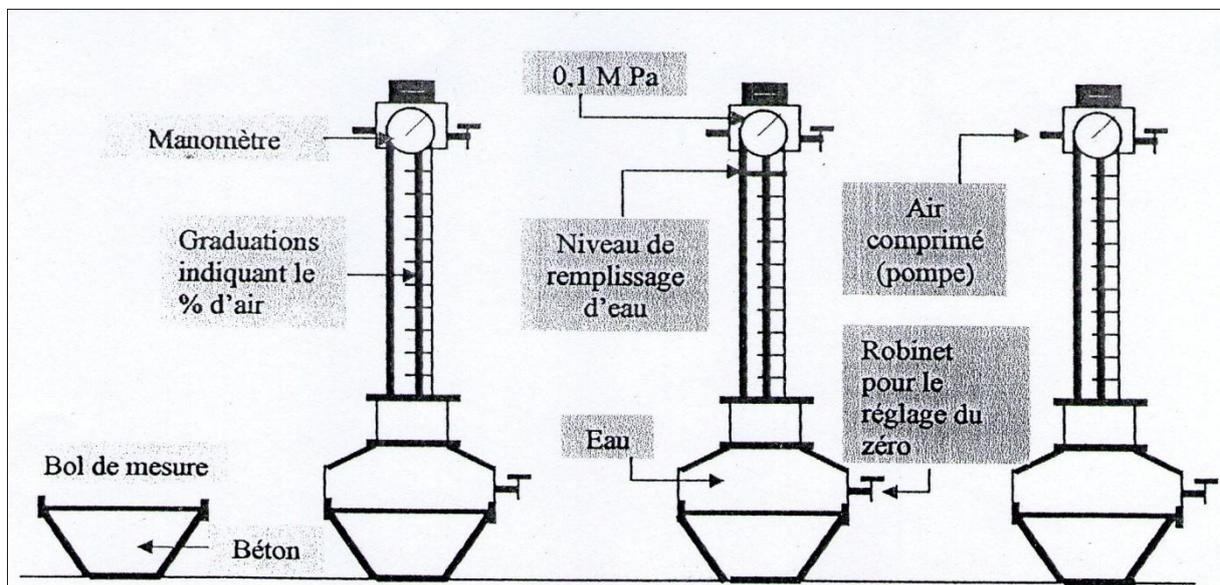


Figure 3-8 : mesure du pourcentage d'air occlus à l'aéromètre à béton.



Figure 3-9 : Aéromètre.

Conduite de l'essai :

Le béton est mise en place dans le bol de mesure de l'aéromètre a béton conformément aux prescriptions de la norme NF P18 – 353.

- La surface supérieure ayant été convenablement arasée, la partie supérieure de l'aéromètre est alors bridée sur le bol de mesure.
- On remplit d'eau la partie supérieure de l'appareil jusqu'au dessus de niveau zéro qui sera réglé en ouvrant le robinet inferieur.
- On applique une pression de 0,1 MPa. Le niveau atteint par l'eau sous l'effet de cette pression indique sur l'échelle graduée le pourcentage d'air occlus. La lecture est répétée à deux autres reprises en réajustant le niveau d'eau.

Remarque :

Dans le cas où le pourcentage d'air occlus est très élevé, il est préférable d'appliquer une pression inferieur à 0,1 MPa, car sinon l'eau descend de la zone de mesure, et une correction est alors appliqué selon la norme.

Résultat obtenus :

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau suivant :

Composition de béton	Volume d'air occlus (%)
Béton de référence	1.8
F.B.B 1/2 (mm)	2
F.B.B 3/8 (mm)	3

Tableau 3-16: volume d'air occlus dans le béton.

Interprétation des résultats :

Les volumes de l'air mesuré par l'aéromètre du béton de référence et de F.B.B 1/2 mm sont presque égaux. La porosité de la fraction 1/2 mm est très petite.

Pour le béton avec la fraction 3/8 mm, le taux du volume d'air est 3%. La différence est due à la porosité existante dans la brique de 3/8 mm.

3-9 Masse volumique fraîche :

Une fois les pesées des moules remplis de béton frais effectuées les résultats des masses volumiques fraîche obtenus sont indiqué dans le tableau

(3-10).

Le volume d'un moule 16 * 32 est égale à 6,43 dm³.



Figure 3-10 : mesure de la masse volumique fraiche.

N° de série d'éprouvette		Granulat utilisé	Masse de béton frais (Kg)	Masse volumique fraiche	ρ_F moyenne
I	1	Béton de Référence	15,32	2,38	2,37
	2		15,26	2,37	
	3		15,20	2,36	
II	1	FBB 1/2(mm)	14,99	2,33	2,32
	2		14,93	2,32	
	3		14,985	2,33	
III	1	FBB 3/8(mm)	14,61	2,27	2,27
	2		14,66	2,28	
	3		14,555	2,26	

Tableau 3-17 : résultats des masses volumiques fraiches.

4-1 Introduction : [2]

En général la résistance des matériaux est sa capacité contre les actions des forces externes (les charges, les conditions d'ambiance) étant définie en contrainte maximale quand l'échantillon est détruit.

La propriété principale de béton durci est sa résistance à la compression. Pour pouvoir évaluer la résistance à la compression, on doit avoir la valeur moyenne de trois échantillons au moins, dont les différences entre eux doivent être inférieure à 15 %.

Il existe deux méthodes pour déterminer la résistance des matériaux :

Méthode «destructive d'échantillons» et méthode « non destructive d'échantillons».

4-2 Méthode destructives d'échantillons :

La méthode de destruction d'échantillon est la plus utilisée, surtout pour déterminer la résistance à la compression de béton, mortier, bloc de béton etc. ... Ce type de détermination est largement employé dans le laboratoire.

Le mode opératoire est le suivant :

- Préparation des échantillons.
- Entretien des échantillons.
- Destruction des échantillons par compression en utilisant la presse.
- Détermination des valeurs de résistance.

4-3 Conservation des éprouvettes : (NA 234).

On stocke les éprouvette dans un endroit en attendant de les démoulés 24 heures après.

Afin d'assurer un bons murissement du béton, on doit maintenir une humidité satisfaisante favorable durant la période d'hydratation du ciment, afin d'éviter l'évaporation rapide de l'eau de gâchage.

Les éprouvettes sont conservées sous l'eau à une température de 20 C ° jusqu'à l'échéance de l'essai.

L'hydratation continue du ciment, rendre le béton plus fort, moins poreux, et plus durable.

4-4 Mesure de la masse volumique apparente moyenne :

On détermine la masse volumique apparente d'un béton en fonction du temps, à partir de des éprouvettes cylindriques conservées dans l'eau.

Le tableau suivant nous donne l'évolution de la masse volumique en fonction du temps :

N° de série	Composition du Béton avec :	Masse Volumique (Kg/dm ³)					
		0 heures	24 heures	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
I	Béton de référence	2.37	2.36	2.37	2.38	2.38	2.38
II	F.B.B 1/2 mm	2.32	2.29	2.33	2.34	2.35	2.35
III	F.B.B 3/8 mm	2.27	2.25	2.30	2.31	2.32	2.32

Tableau 4-1 : évolution de la masse volumique en fonction du temps.

Le diagramme 4-1 montre l'évolution de la masse volumique en fonction du temps.

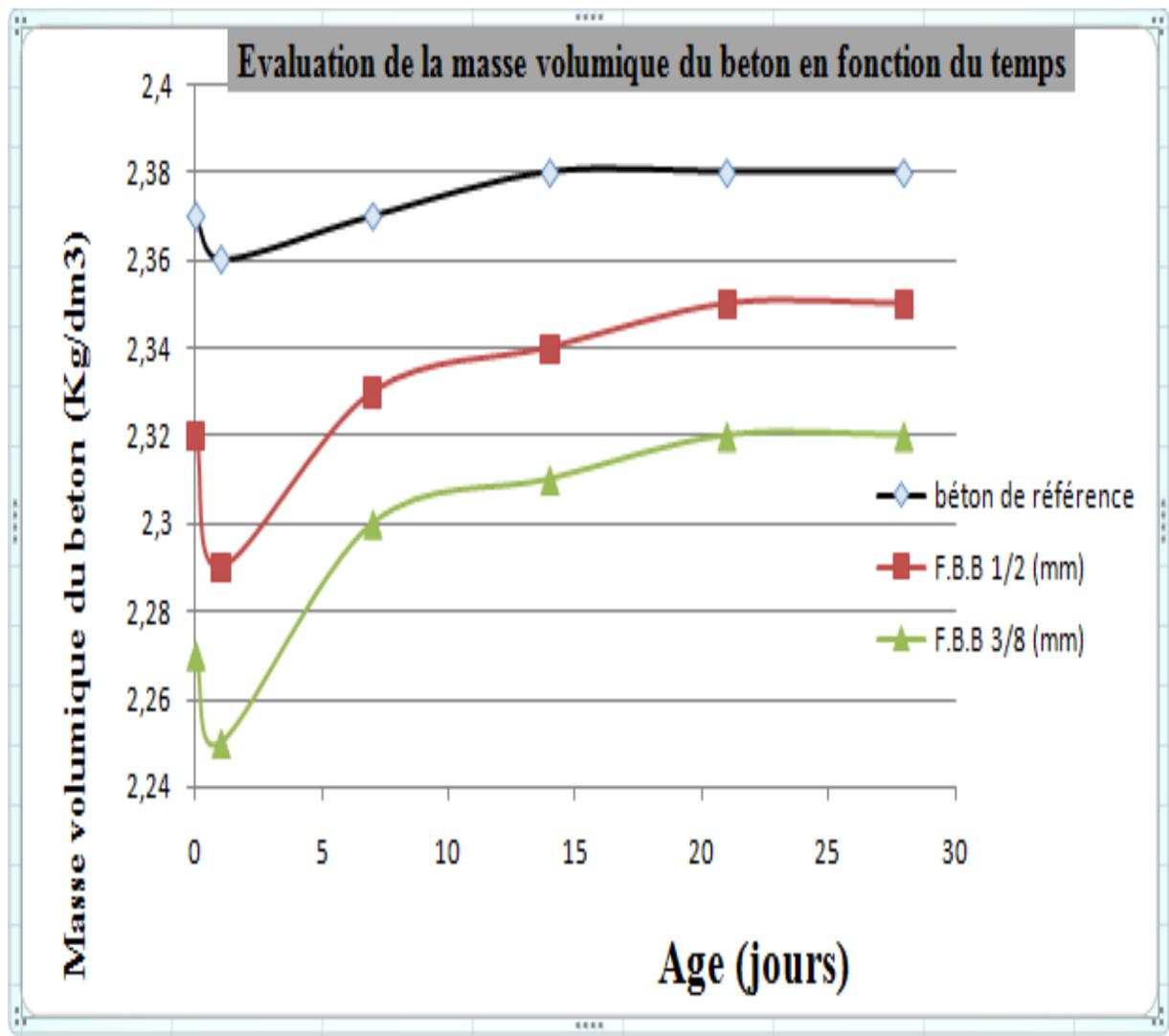


Figure 4-1 : evaluation de la masse volumique du béton en fonction du temps.

Interprétation :

Diminution de la masse volumique des bétons.

[0-24 heures] : conservation des bétons dans les moules. Départ d'eau du à l'évaporation.

[24heures au 21 jours] : perpétuelle évolution de la masse volumique. Ceci est du à l'absorption de l'eau par le béton.

[21 au 28 jours] : stabilisation de la courbe. Ceci explique que le béton n'absorbe plus d'eau.

4-5 Résistance à la compression :

4-5-1 Paramètres influant sur la résistance :

En pratique, on lie souvent la résistance ultime de béton en compression qui apparait comme facteur essentiel dans la conception des ouvrages, au rapport (eau/ciment). Cependant à coté de ce facteur d'autres paramètres jouent également un rôle très important sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques du béton. Parmi ces paramètres, on peut citer :

- l'âge du béton ;
- La nature et le dosage en ciment ;
- La nature minéralogique des granulats ;
- L'adhérence de la pate aux granulats (interface (ciment /granulat)) ;
- Le dosage en eau ;
- La température ;
- L'humidité ;
- Les conditions de mise en œuvre et la qualité de contrôle sur chantier ;

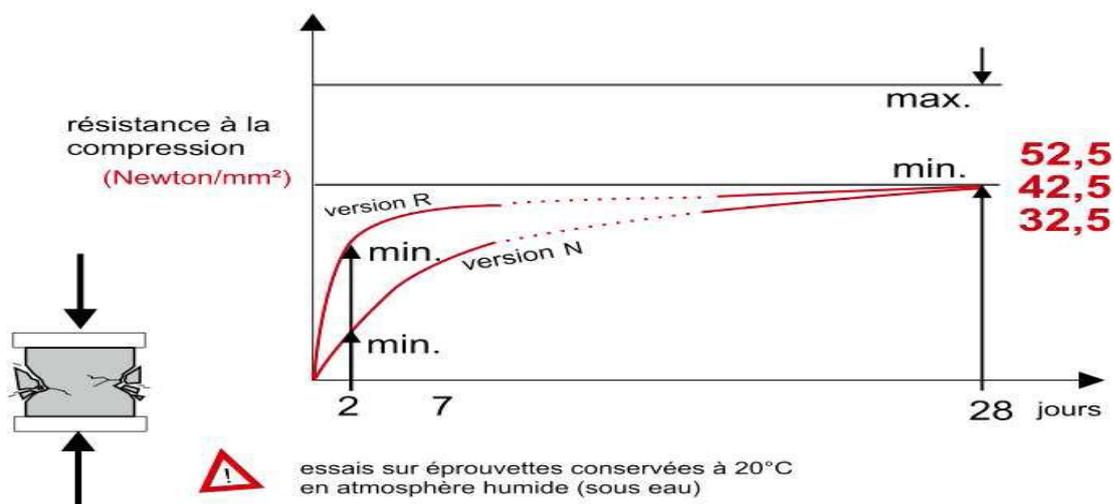


Figure 4-2 : résistance à la compression. [2]

4-6 Essai de compression : [8]**But de l'essai :**

L'essai a pour but de déterminer la résistance à la compression du béton.

Principe de l'essai :

L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à rupture.

La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

Equipement nécessaire :

- Une machine d'essai appelé «presse» de force et de dimensions approprié à l'éprouvette à tester.
- Un moyen pour rectifier les extrémités des éprouvettes (surfaçage au souffre) pour éviter l'excentricité de l'effort P.

Rectification des extrémités des éprouvettes :

L'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cylindriques dont les extrémités ont été préalablement rectifiées car, il est difficile de confectionner des éprouvettes dont la surface est suffisamment plane (par suite d'une mauvaise finition du béton frais, d'un stockage sur plan machine ...).

La rectification consiste donc, à rendre ces surfaces (notamment l'extrémité supérieure) planes et perpendiculaire aux génératrices du cylindre. Pour parvenir à ce résultat, on réalisera un surfaçage au souffre qui consiste à munir chaque extrémité de l'éprouvette d'une galette à base de souffre, respectant les deux exigences : la planéité et la perpendicularité aux génératrices.

- La planéité est assurée de la façon suivante :

Le mélange souffre est liquéfié (à une température de $125\text{ C}^\circ \pm 5\text{C}^\circ$) est versé sur une platine dont le fond a été rectifié.

- La perpendicularité est obtenue grâce à un dispositif de guidage qui maintient les génératrices de l'éprouvette perpendiculaire au fond rectifié.

L'éprouvette maintenue par le dispositif de guidage est descendue sur le soufre liquéfié. Quand, après refroidissement, le soufre s'est solidifié.

L'éprouvette (à laquelle adhère alors la galette de soufre) est désolidarisée de la Platine et il est procédé au surfacage de la deuxième extrémité.

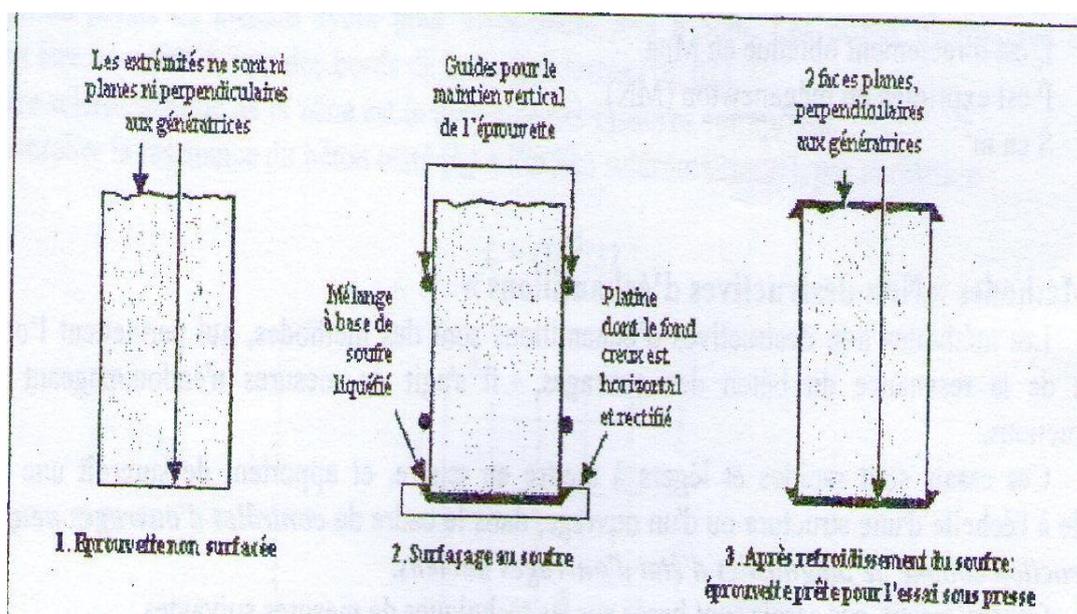


Figure 4-3 : principe de surfacage au soufre (ou au ciment prompt).

Conduite de l'essai :

L'éprouvette, une fois rectifiée, doit être centrée sur la presse d'essai à l'aide d'un gabarit de centrage prenant appui sur l'éprouvette (et non sur le produit de surfacage).

La charge de rupture P , est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. Soit S la section orthogonale de l'éprouvette, la résistance F_c , est exprimé en MPa à 0.5 MPa près et a pour expression :

$$F_c = \frac{P}{S}$$

- F_c est directement obtenue en MPa.
- P est exprimé en méga newton (MN).
- S est la section en m^2 .

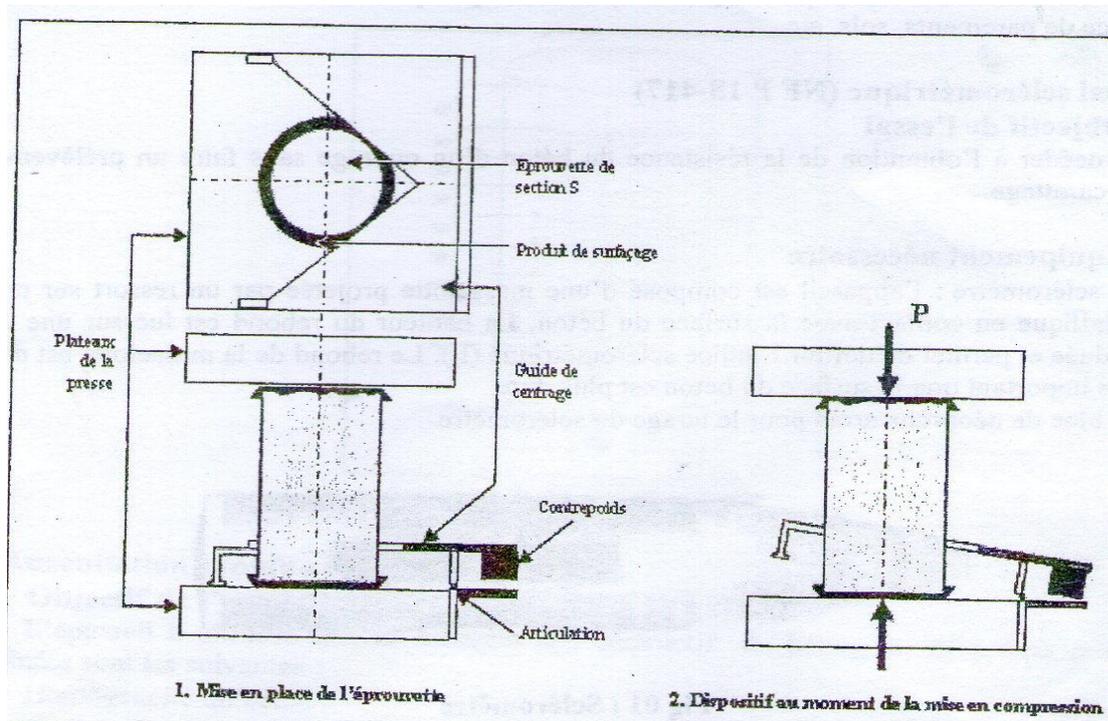


Figure 4-4 : exemple de dispositif de centrage de l'éprouvette sur la presse.

Résultat de la compression :

Les essais de la compression ont été effectués au 7^{ième}, et au 28^{ième} jours au niveau de laboratoire de béton.

On note :

- F_{c07} : résistance du béton au 7^{ième} jour.
- F_{c28} : résistance du béton au 28^{ième} jour.

Résultat des essais de compression au 7^{ième} jour :

N° de la série d'éprouvette		Composition du béton	Charge de rupture au 7 ^{ième} jour : P(KN)	Résistance F_{c7} (MPa)	Résistance F_c moyenne (MPa)
I	1	Béton de référence	377.8	18.8	18.46
	2		367.3	18.1	
	3		371.7	18.5	
II	1	F.B.B	317.5	15.8	16.92
	2	1/2	331.5	16.49	
	3		371.7	18.49	
III	1	F.B.B	297.3	14.8	14.53
	2	3/8	287.3	14.3	
	3		291.3	14.5	

Tableau 4-2 : résistance à la compression au 7^{ième} jour.

N° de la série d'éprouvette		Composition du béton	Charge de rupture au 28 ^{ième} jour : P(KN)	Résistance F _{c28} (MPa)	Résistance F _{c28} moyenne (MPa)
I	1	Béton de référence	542.1	27.1	26.83
	2		536	26.8	
	3		532	26.6	
II	1	F.B.B	433.3	21.7	21.93
	2	1/2mm	415.2	20.8	
	3		466.0	23.3	
III	1	F.B.B	385.4	19.3	20.1
	2	3/8mm	432	21.6	
	3		388	19.4	

Tableau 4-3 : résistance à la compression au 28^{ième} jour.

4-7 corrections et ajustement de la formulation :

Des corrections nécessaires seront apportées pour les compositions finales du béton, en fonction des résultats obtenues après confection d'éprouvettes à l'âge de 28 jours.

Ajustement de la formulation au m³ :

- ✚ Calcul de la densité réelle du béton : elle est donnée par la formule suivante :

$$D' = p_{ép} / V_{ép}$$

$p_{ép}$ = poids de l'éprouvette pris avant l'écrasement à l'âge de 28 jour.

$V_{ép}$ = volume de l'éprouvette.

- ✚ Détermination du poids $p_{ép}$:

Type de béton	Poids des éprouvettes « Pi » en grammes.			
	N° de série	1	2	3
Béton de référence		15340	15300	15090
F.B.B 3/8 mm		14830	14895	14780

Tableau 4-4 : poids des éprouvettes à l'âge de 28 jours.

✚ Calcul de D' :

$$P_{\text{ép}} = \sum Pi / \text{nombre des éprouvettes.}$$

$$P_{\text{ép}} = 45730 / 3 = 15243 \text{ g.}$$

$$V_{\text{ép}} = 6430 \text{ cm}^3.$$

$$\text{On a : } D' = p_{\text{ép}} / V_{\text{ép}} \rightarrow D' = 2.37 \text{ g/cm}^3.$$

Correction sur les éprouvettes de béton de référence :

$$D_0 = 2.23 \text{ g/cm}^3 \text{ (voir chapitre 3, page 88) .}$$

$$\text{On a : } D' = 2.37 \text{ g/cm}^3 > D_0 = 2.23 \text{ g/cm}^3, \text{ et } D' - D_0 > 0.$$

D'où : le béton est sous dosé.

Alors, il y a lieu d'apporter des corrections sur les masses de ces dernières.

$$\text{Masse total des granulats en Kg} = 1000 (D' - D_0) = 140 \text{ Kg.}$$

$$\text{Sable 0/3} 140 * 0.33 = 46.2 \text{ Kg.}$$

$$\text{Gravillons 3/8.....} 140 * 0.14 = 19.6 \text{ kg}$$

$$\text{Gravillons 8/15.....} 140 * 0.18 = 25.2 \text{ kg}$$

$$\text{Gravillons 15/25.....} 140 * 0.35 = 49 \text{ kg}$$

D'où les dosages corrigés des constituants (en kg/m^3) sont les suivants :

$$\text{Ciment.....} 350 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Eau} 184.2 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Sable 0/3.....} 564.82 + 46.2 = 611.02 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Gravillons 3/8.....} 233 + 19.6 = 252.6 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Gravillons 8/15.....} 306.1 + 25.2 = 331.3 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Gravillons 15/25.....} 595.22 + 49 = 644.2 \text{ kg/m}^3$$

D'où $D_0 = 2.37 \text{ g/cm}^3$.

Correction sur les éprouvettes de béton avec F.B.B 3/8 (mm) :

Calcul de D_0 :

Ciment..... 350 kg/m^3

Eau 184.2 kg/m^3

Sable 0/3..... 479.18 kg/m^3

F.B.B 3/8..... 162.72 kg/m^3

Gravillons 8/15..... 493.12 kg/m^3

Gravillons 15/25..... 543.93 kg/m^3

$D_0 = 2213.15 \text{ Kg/m}^3 = 2.21 \text{ g/cm}^3$.

$D' = 2.3 \text{ g/cm}^3$

$D' - D_0 > 0$, d'où le béton est sous dosé en granulats.

Alors, il y a lieu d'apporter des corrections sur les masses de ces dernières.

Masse total des granulats en Kg = $1000(D' - D_0) = 1000(2.3 - 2.21) = 90 \text{ Kg}$.

Sable 0/3 $90 * 0.33 = 29.7 \text{ Kg}$.

F.B.B 3/8..... $90 * 0.22 = 19.8 \text{ kg}$

Gravillons 8/15..... $90 * 0.10 = 9 \text{ kg}$

Gravillons 15/25..... $90 * 0.35 = 31.15 \text{ kg}$

D'où les dosages corrigés des constituants (en Kg/m^3) sont les suivants :

Ciment..... 350 kg/m^3

Eau 184.2 kg/m^3

Sable 0/3..... $479.18 + 29.7 = 508.88 \text{ kg/m}^3$

F.B.B 3/8..... $162.72 + 19.8 = 182.52 \text{ kg/m}^3$

Gravillons 8/15..... $493.12 + 9 = 502.12 \text{ kg/m}^3$

Gravillons 15/25..... $543.93 + 31.15 = 575.08 \text{ kg/m}^3$

D'où : $D_0 = 2.3 \text{ g/cm}^3$.

Résistance moyenne d'un béton : [17]

Le gâchage du béton est une phase cruciale, en théorie, il faut bien gaucher un béton en bétonnière pour assurer la bonne répartition des différents composants et lui donner une bonne cohésion parfaite.

Avant dire qu'un gâchage manuel. Comme cela se fait généralement sur le terrain, est loin de permettre une homogénéité parfaite.

Les écarts types ainsi que les coefficients de variation calculés sur les trois valeurs individuelles de résistance à la compression, nous permet de vérifier l'homogénéité parfaite des bétons lors de malaxage, la bonne vibration du béton et la fiabilité de l'essai à la compression.

4-8 Masse volumique sèche : [14], [15]**4-8-1 Calcul de la masse volumique sèche théorique :**

Une formule théorique permet d'évaluer la masse volumique sèche du béton et la comparer avec celle calculée.

La formule est :

$$\rho_{\text{sèche théorique}} = 1.25 * C + G \quad \text{Kg/m}^3$$

G : masse des granulats secs, en Kg/m³ (ajout, sable et gravier).

S : teneur en ciment Kg/m³.

Le facteur «1.25» est composé de 100% de la teneur en ciment + Le ciment qui lie chimiquement une quantité d'eau de 25 %.

Béton de référence :

Rappelons que la masse «G», contenue dans 1m³ de béton :

$$G = 1699.14 \text{ Kg/m}^3.$$

La teneur en ciment est : C = 350 Kg/m³.

$$\begin{aligned} \rho_{\text{sèche théorique}} &= 1.25 * C + G \\ &= 1.25 * 350 + 1699.14 \\ &= 2136.64 \text{ Kg/ m}^3 \\ &= 2.14 \text{ Kg/ dm}^3. \end{aligned}$$

Béton avec F.B.B 3/8 :

Rappelons que la masse «G», contenue dans 1m^3 de béton :

$$G = 1678.95 \text{ Kg/m}^3.$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{sèche théorique}} &= 1.25 \cdot 350 + 1678.95 \\ &= 2116.45 \text{ kg/m}^3 \\ &= 2.11 \text{ kg/dm}^3. \end{aligned}$$

4-8-2 Masse volumique sèche pratique :**Calcul de la masse volumique sèche au 28^{ième} jours d'âge :**

Pour calculer la masse volumique sèche, il suffit de suivre les étapes suivantes :

- ✓ Après écrasement des éprouvettes, à l'aide de la machine de compression, un échantillon de béton est immédiatement récupéré.
- ✓ Peser l'échantillon après étuvage.
- ✓ Le laisser dans une étuve à 105°C et lui effectuer des pesées jusqu'à ce que sa masse soit constante.

-connaissant la masse d'une éprouvette à 28 jours d'âge et son volume (6.43 dm^3). Et la masse de l'échantillon prélevé avant et après étuvage, on calcule par la règle de trois la masse volumique sèche.

Exemple de calcul :**Béton de référence :**

La masse de l'éprouvette à 28 jours d'âge (avant écrasement est égale à 15.34Kg)

La masse de l'échantillon récupéré (avant écrasement de l'éprouvette et avant son étuvage) est égale à 1.304Kg .

La masse de même échantillon après étuvage est égale à 1.266Kg .

On peut donc, déduire la masse de l'éprouvette après étuvage.

Soit «M» sa masse, on aura :

<u>Avant étuvage</u>	<u>après étuvage</u>
1.204 Kg.....	1.105kg
15.34Kg	M= 14.07Kg

Les résultats de calcul des masses volumiques sèches des bétons sont représentées dans le tableau suivant :

N° d'éprouvette	Composition de béton	$\rho_{\text{sèche}} \text{ (Kg/dm}^3\text{)}$	$\rho_{\text{sèche}} \text{ moyenne (Kg/dm}^3\text{)}$
1	Béton de référence	2.18	2.17
2		2.18	
3		2.15	

Tableau 4-5 : masse volumique sèche du béton.

Béton avec F.B.B (1/2 mm) :

N° d'éprouvette	Composition de béton	$\rho_{\text{sèche}} \text{ (Kg/dm}^3\text{)}$	$\rho_{\text{sèche}} \text{ moyenne (Kg/dm}^3\text{)}$
1	F.B.B (1/2 mm)	2.15	2.14
2		2.13	
3		2.16	

Tableau 4-6 : masse volumique sèche du béton avec F.B.B (1/2mm).

Béton avec F.B.B (3/8 mm) :

N° d'éprouvette	Composition de béton	$\rho_{\text{sèche}} \text{ (Kg/dm}^3\text{)}$	$\rho_{\text{sèche}} \text{ moyenne (Kg/dm}^3\text{)}$
1	F.B.B 3/8 mm)	2.11	2.11
2		2.12	
3		2.11	

Tableau 4-7 : masse volumique sèche du béton avec F.B.B (3/8mm).

Conclusion :

Les bétons avec les fractions 1/2 et 3/8 mm ont des masses volumiques inférieures à celles des bétons de références. Ceci s'explique par le fait que les granulats et le sable ont été subit par des fractions plus légères (voir leurs masses volumiques apparentes).

Donc l'introduction de granulat léger dans un béton permettre d'alléger ce dernier.

Introduction :

La résistance maximale d'un béton s'acquiert progressivement avec le temps. On parle du temps de prise qui dépend du ciment utilisé (qualité, âge, etc.), des conditions de température, et de la qualité des agrégats et de leurs proportions.

Tableau récapitulatif des résistances à la compression au différent âge du béton :

Composition du béton avec :	Résistance à 7 jours F_{c7} (MPa)	Résistance à 28 jours F_{c28} (MPa)
Béton de référence	18.46	26.83
F.B.B (1/2)	16.92	21.93
F.B.B (3/8)	14.53	20.1

Le digramme des résistances est représenté sur la figure suivante :

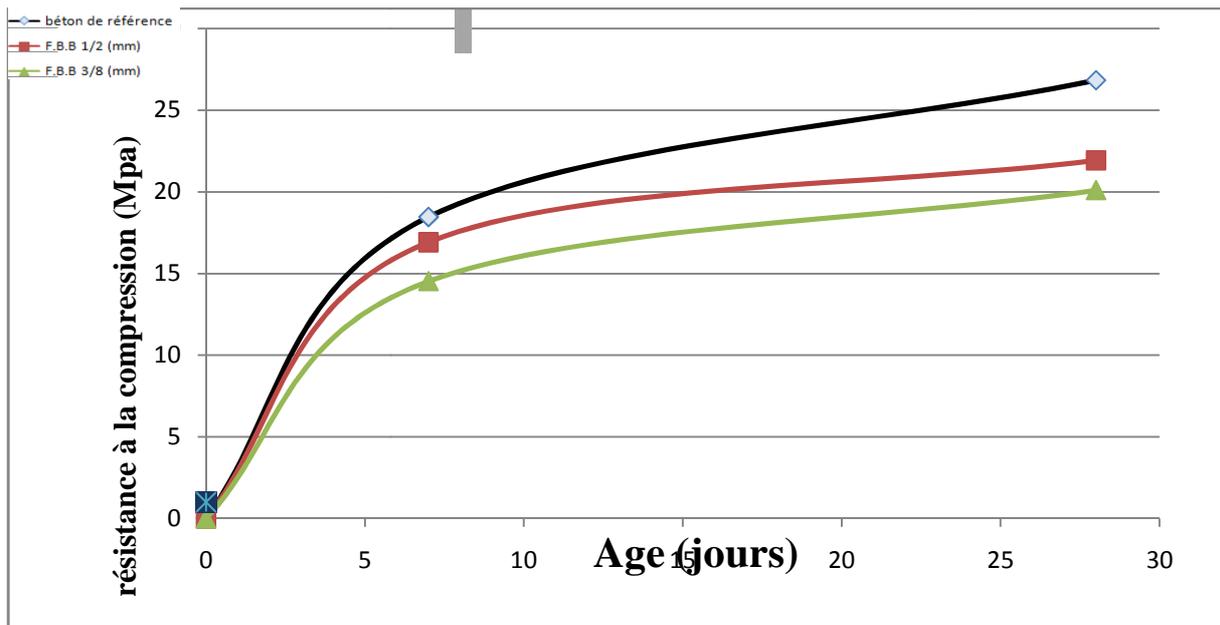


Figure 5-1 : résistance à la compression.

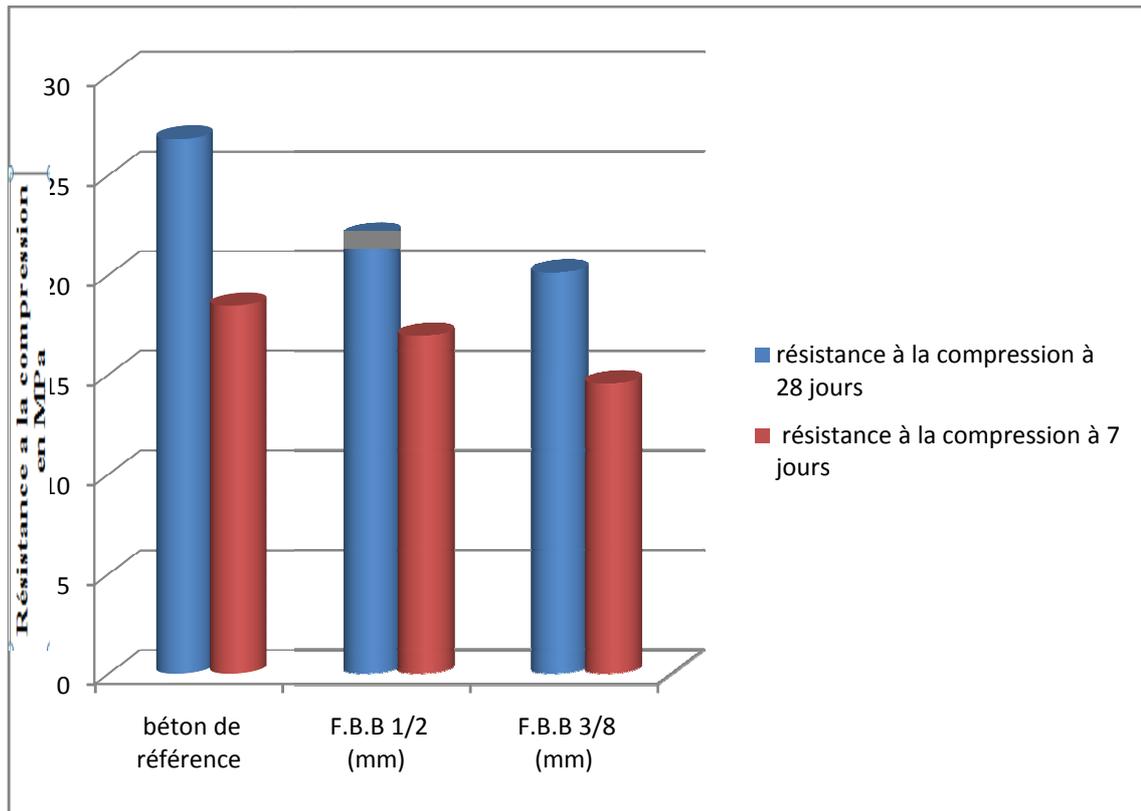


Figure 5-2 : résistance à la compression à 7 et à 28 jours.

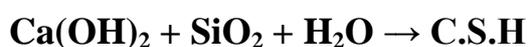
Interprétation :

Le rapport des résistances à la compression des bétons de références à 7 et à 28 jours de l'ordre de 68%. Ceci explique bien que le ciment utilisé est un ciment de résistance à la compression très élevée à court terme. Le choix de ce béton de référence pour comparer les résistances à la compression à 7 et à 28 jours est pris, car le chemin de rupture passe exactement à travers la matrice cimentaire.

La résistance à la compression des bétons avec la fraction 3/8 mm à 7 et à 28 jours inférieures à celle des autres bétons.

Lors de l'écrasement de l'éprouvette, il a été constaté que le chemin de rupture le plus faible passe à travers la fraction poreuse 3/8 mm.

La substitution de la fraction 1/2 mm n'a pas contribué à l'élévation de la résistance à la compression. Cette fraction 1/2 mm est très grosse pour permettre de réagir avec le Ca(OH)_2 libéré lors de l'hydratation du ciment pour donner des hydrates C.S.H selon la réaction pouzzolanique :



Donc il est recommandé de substituer une partie plus fine $< 0.63\mu\text{m}$ pour qu'on puisse avoir une augmentation de la résistance à la compression.

Conclusion

Conclusion :

L'incorporation des fractions 1/2 et 3/8 mm de la brique broyée comme déchet industriel, nous renseigne sur leur influence respectives sur la résistance à la compression du béton.

En effet, les propriétés physiques (porosité, légèreté) de la fraction 3/8 mm donnent des résistances à la compression inférieure à celle du béton témoin, et diminution de la densité du béton. Ainsi, l'introduction des granulats légers dans un béton permet de l'alléger ce dernier.

Par ailleurs, la porosité de la fraction 1/2 mm est inférieure à celle de la fraction 3/8 mm, qui donne une résistance élevée par rapport à cette dernière.

Dans ce travail, on s'est limité à l'utilisation de deux fractions de la brique broyée et à l'étude de leurs influences sur la résistance à la compression du béton. Mais l'utilisation des déchets de briques comme sable à béton peut être plus bénéfique, car la substitution d'une partie plus fine $< 0.63\mu\text{m}$ pour qu'on puisse avoir une augmentation à la résistance à la compression due à la réaction pouzzolanique.

En fin, nous pensons que la continuité de ce travail et l'exploitation des matériaux recyclés nécessitent une attention particulière.

Références bibliographiques

- [1] N.CHELOUAH, TP béton, 3^{ème} année, université de Bejaia.
- [2] CHERATI YACINE, NAFA ZAHREDINNE, «éléments de matériaux de construction t essais, université de GUELMA».
- [3] GEORGE DREUX, JEAN FESTA, «nouveau guide de béton» 7^{ième} édition.
- [4] S.KHERBACHE, R DJILĀĒ, PFE 2003 «étude de l'influence des fines contenues dans les sables concassés sur la résistance des bétons».
- [5] XP P18 540 / «granulats - définition, conformité et spécification» (octobre 1997)
- [6] ATTIL, TP béton 3^{ème} année 2010, université' de Bejaia.
- [7] document de la société des matériaux de construction : gisement d'argile d'IGHIL OUBAROUAK.
- [8] S. AREZKI : laboratoire de béton, université de Bejaia.
- [9] G.DREUX, guide pratique du béton, collection de l'ITBTP, R .LANCHO, J.C SAINT –ARROMAN : «granulats, sols, ciment et bétons».
- [10] R.DUPAIN ; R.LANCHO, J.C.SAINT-ARROMAN : « granulats, sols, ciments et bétons ».
- [11] EMILE OLIVIER/ « technologie des matériaux de construction ».
- [12] F .GABRYSIK- matériaux-« les bétons ».
- [13] fiche technique du ciment CPJ 42.5 DE AIN EL KEBIRA.
- [14] Wesche, K; Baustoffe für tragende bautteile; Beton und masswerk; Bouverlag; Wiesbaden / Berlin, 1993.
- [15] Lohmeyer, G ;Beton – Technik; Handbuch für und Constructeurs. Beton Verlag; Düsseldorf, 1989.
- [16] Belaid Kamel, Djabellah Samir, PFE 2004 «étude de l'influence de la brique broyée sur la résistance à la compression du béton» , université de Bejaia.
- [17] A. Brahma / « le béton » / Université de Blida ; Edition O.P.U.

[18] JACQUES FRACHBOURG, « contribution à l'étude de quelques pouzzolanes naturelles et artificielle en vu de la fabrication des ciments de pouzzolane », école polytechnique de l'université de Lausanne, 1965.

Lexique

Ressuage : remontée éventuelle d'eau à la surface d'un mortier ou d'un béton avant la prise, cette remontée d'eau est liée au tassement, sous l'effet de leurs poids, des éléments solides (ciment et granulat) qui composent le matériau, le tassement est possible parce que, malgré le serrage réalisé mise en place, les grains du ciment sont en suspension.

Marnes: roches argileuses contenant une forte proportion au moins 15% de calcaire qu'on utilise pour la fabrication du ciment.

Dolomite : roches dont la composition minéralogique contient des carbonates de calcium et de magnésium.

Coke : résidu de la distillation de certaines houilles.

Minerai : minéral constitué de matériaux en concentration suffisante pour être extraite.

Scorie : appellation anglaise de clinker.

Magnésie : chimie, oxyde de magnésium sous forme de poudre blanche.

Manganèse : métal de couleur gris clair, utilisé dans un grand nombre de maillage.

Houille : minéral solide noir d'origine végétal, riche en Carbone «charbon».

Lignite : charbon.

Basalte : roche volcanique, éruptive, noire et dur, formée de petits cristaux de silicates.

Laitiers : sous produit résiduel apparaissant à la surface des métaux en fusion.

Granite : roche magmatique, roche dur et cristalline.

Quartzite : roche métamorphique dense et dure, composé principalement de quartz.

Exothermiques : en chimie qui dégage de l'énergie et de la chaleur.

GYPS : composée de sulfates de calcium hydraté.

ASTM C 618-98: standard specification for coal fly ash an raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.

NF P 18-101 : norme française qui décrit les granulats –vocabulaire –et classification.

EN 196-1 : norme européenne décrivant les méthodes d’essais des ciments-
détermination des résistances mécaniques.

NF P 15-301 : norme française qui décrit les liants hydrauliques-définitions-
classification et spécification des ciments.

NF P 18-303 : norme française décrivant l’eau de gâchage.

NF P 18-560 : norme française décrivant l’analyse granulométrique.

NF P 18-597 et NF P 18-598 : normes françaises qui décrivent le mode
opératoire de l’essai d’équivalent de sable à 10% de fines

NF P 18-541 : norme française qui décrit le mode opératoire de calcul de mode
de finesse.

NF P 18-533 : norme française qui décrit la préparation de l’échantillon pour
l’essai d’équivalent de sable de 10% de fines.

NF P 18-554 et NF P 18-555 : normes françaises qui décrivent le mode
opératoire de l’essai de la mesure des masses volumique.

NA 440 : norme Algérienne décrivent les liants hydraulique – ciment :

Composition, spécifications et critères de conformité.

NA 234 : méthodes d’essais des ciments –détermination des résistances
mécaniques.

EN 193-3 : norme européenne qui décrit le mode opératoire de l’essai de prise
aiguille de VICAT.

NF P 15-433 : norme française qui définit les méthodes d’essai des ciments –
détermination de retrait et de gonflement.

NF P 15-432 : norme française qui décrit le mode opératoire de l’essai LE
CHATELIER.

NF P 18-404 : norme française qui détermine les essais d'étude, les essais de convenance et de contrôle.

NF P 18-400 : norme française déterminant les caractéristiques des moules normalisés.

NF P 18-451 : norme française qui décrit le mode opératoire de l'essai d'affaïssement au cône d'ABRAMS.

NF P 305 : norme française décrivant les bétons prêts à l'emploi.

EN V 206 : norme européenne décrivant différentes classes d'affaïssement du béton.

NF P 18-353 : norme française qui décrit le mode opératoire de l'essai de contrôle de volume d'air entraîné.

NF P 18-553 : norme française décrivant la préparation d'un échantillon pour essai.

NF P 18-406 : norme française décrivant le mode opératoire de l'essai de compression.