

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA, -Bejaïa -



Faculté de Technologie
Département de Génie Civil

Mémoire

Pour obtenir le titre de Master en Génie Civil

Option : Matériaux et Structures

Thème

ETUDE DE L'INFLUENCE DES AJOUTS SUR LES RESISTANCES DU BETON

Présenté par

M^{LLE}. TAFOUK Fatima

M^{LLE}. MOUZAOUI Ouahiba

Soutenu le « 03 -06 -2012 » devant le jury composé de :

Mr. MHIDI KHALED	Maitre-assistant A	Président
M ^{me} . ATTIL SOUAD	Maitre-assistant A	Rapporteur
Mr. CHELOUAH NACER	Maitre de conférence	Examineur

ANNEE 2011/2012

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier en premier lieu, notre seigneur Dieu, le tout puissant qui nous a donné la patience, le courage et grâce auxquels nous avons pu achever ce mémoire.

Tout d'abord, un énorme et chaleureux merci à M^{me} ATTIL notre chère promotrice, pour avoir encadré et suivi ce travail.

Madame merci beaucoup pour votre disponibilité, pour les nombreuses et intéressantes discussions scientifiques, pour vos orientations constructives, pour les remarques, pour les nombreux conseils avisés, pour vos encouragements quotidiens, pour ne pas avoir cessé, pour le soutien permanent, pour votre compréhension, pour la confiance que vous nous avez accordée et, pour votre écoute et, tout simplement pour votre gentillesse, et sans oublier bien sûr, de remercier votre famille.

Le grand humanisme, la simplicité, le dynamisme et la grande compétence ainsi que la démarche scientifique de notre promotrice resteront pour nous un modèle. Nous avons trouvé dans ses grandes qualités humaines et sa culture une source inépuisable d'enrichissement.

Nous remercions les membres du jury Mr. N.CHELOUAH et Mr. K.MHIDI, de s'être donné la peine d'examiner notre modeste travail.

Ainsi qu'à toute les personnes qui nous a apporté leur aide, et particulièrement :

- *Melle Hassiba secrétaire du département Génie Civil université de Bejaia.*
- *Mr. SERIKMA Mourad et toute l'équipe du CTC-Est de Bejaia.*
- *Mr ROUDEOUANE Wardi entrepreneur et son ingénieur Mounir.*
- *Mr. BOUZKRI, BOUHIRED, MEKKI Tahir et, à toute l'équipe du laboratoire LTP-Est de Bejaia.*
- *Mr DJENNADI Khaled gérant d'entreprise TISSA-PLUS.*
- *Mr Haddi et Mr ATTAL des enseignants à L'université de Bejaia.*
- *Mr MEZHOU D Djillali enseignant à L'université de Bejaia.*

Un grand merci aux techniciens du Laboratoire Mr Djamel, Mr Fawzi et Mr Saïd pour leurs disponibilité et, leurs compréhensions au niveau de laboratoire.

Et enfin, nous exprimons notre reconnaissance à tous les enseignants qui nous ont enrichis avec un précieux savoir qui est le meilleur héritage pour l'avenir.

Dédicaces

Je dédie ce présent travail à mes chers et nobles parents dont je suis et je serais pleinement reconnaissant pour m'avoir soutenu durant tout mon parcours, et aussi :

- *à ma sœur Nawal ;*
- *A mon neveu Axel ;*
- *A mes frères : Samir, Adel, Lyes et Sofiane.*
- *A toute la grande famille : mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines ;*
- *A ma binôme Ouahiba et toute sa famille.*

Que Dieu vous bénisse !

Fatima.

Je dédie ce présent travail à mes chers et nobles parents dont je suis et je serais pleinement reconnaissant pour m'avoir soutenu durant tout mon parcours, et aussi :

- *A mes frères : Zahir, noureddine et mourad ;*
- *à mes sœurs : Naima et Ghania;*
- *A mes nièces et neveux (Dahia, Dahinan, Mouhend et Idir) ;*
- *A toute la grande famille : mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines ;*
- *A ma binôme Fatima et toute sa famille.*

Que Dieu vous bénisse !

Ouahiba.

A tous nos amis (es) : (Sofiane, Djamel, Safia, Rabeh, Adel, Alili, Hanafi, Sabrina et Karim).

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Résumé

L'accélération des cadences de travail imposées par les producteurs exige de trouver des moyens et des techniques nécessaires pour améliorer rapidement les temps de prise et de durcissement du béton ainsi que sa résistance à la compression au jeune âge. Cela nécessite évidemment des moyens qui permettent d'augmenter cette résistance.

L'optimisation à court terme des opérations de construction sur chantier telle que le décoffrage, passe d'abord par un travail de formulation : choix du ciment, du rapport E/C, des adjuvants, des additions minérales, etc, et nécessite la connaissance de la résistance du béton dans l'ouvrage.

La température de cure a un rôle majeur sur le développement des propriétés mécaniques du béton. Au jeune âge, tout montre que c'est simplement l'augmentation du degré de réaction qui est responsable des résistances plus élevées à haute température. Dans ces conditions, il est clair que la résistance à court terme, mesurée sur des éprouvettes normalisées, n'est généralement pas représentative de la résistance du béton dans l'ouvrage.

Des nouvelles notions telles que l'énergie d'activation et l'âge équivalent, permettent de prendre en considération l'effet de la température sur l'avancement des réactions d'hydratation du ciment, et une nouvelle technique de la maturométrie permet d'évaluer la résistance du béton à court terme en tenant compte de l'énergie d'activation et l'âge équivalent, donc l'effet couplé de la température et du temps sur la résistance d'un béton. Tous ces points et ces paramètres qui influent sur la résistance du béton au jeune âge sont les objectifs de notre recherche.

Mots-clés : béton, résistance, jeune âge.

Abstract

The Acceleration of the rate of work imposed by the producers requires to find the necessary means and techniques in order to quickly improve the time of setting and hardening of concrete; as well as, its compressive strength at first stage. This, of course, requires averages which enable to increase this resistance.

The short term optimization of building operation on-site such stripping, begins with a formulation work: choice of cement, the W/C ration proportion of adjuvant, alloying elements , etc. and requires the knowledge of the strength of concrete on the project.

Curing temperature has a major role in the development of mechanical properties of concrete .At first stage; everything seems to show that it is simply the increasing of the degree of reaction which is responsible for higher resistance to high temperature. In these conditions, it is clear that the strength at short-term, measured on standard specimens is not generally representative of the strength of concrete in the structure.

New concepts such as activation energy and the equivalent age, allows to consider the effect of temperature on cement hydration reactions, it is a new technique of maturométrie which allows the evaluation of concrete strength in short term, taking into consideration the activation of the energy and the equivalent age; therefore, the coupled effect of the temperature and time on the strength of the concrete. All these points and the influent parameters on the strength of the concrete at first age are the objectives of our researches.

Keywords: concrete, résistance, first stage.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	II
DEDICACES.....	III
RESUME.....	IV
ABSTRACT.....	V
TABLE DES MATIERES	VI
TABLE DES FIGURES	IX
TABLE DES TABLEAUX	XI
NOTATIONS	XIII
INTRODUCTION GENERALE.....	14
PARTIE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	16
CHAPITRE I : CONSTITUANTS DU BETON	17
INTRODUCTION	17
I.1 COMPOSITION DU BETON	18
I.1.2 LES GRANULATS.....	21
I.1.3 LES ADJUVANTS	22
I.1.4 EAU DE GACHAGE	23
I.1.5 LES ADDITIONS	23
CONCLUSION	24
CHAPITRE II : HYDRATATION DU CIMENT	25
INTRODUCTION	25
II.1 HYDRATATION.....	26
II.2 LA PRISE	26
II.3 DURCISSEMENT.....	26
II.4 COMPOSITION DU CIMENT PORTLAND.....	26
II.5 HYDRATATION DES COMPOSANTS DU CIMENT.....	28
II.6 EVOLUTION DE L'HYDRATATION	31
CONCLUSION	33
CHAPITRE III : RESISTANCE A COURT TERME DU BETON.....	34
INTRODUCTION	34
III.1 DEFINITION DE LA NOTION DE « COURT TERME ».....	35
III.2 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LA RESISTANCE A COURT TERME DU BETON	35
III.3 LE CONCEPT D'AGE EQUIVALENT	37

III.4	LE PARAMETRE ENERGIE D'ACTIVATION APPARENTE DU BETON	38
III.5	PRINCIPES D'UTILISATION DU CONCEPT D'AGE EQUIVALENT POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE DU BETON	39
III.6	LES MOYENS PERMETTANT DE REGLER LA RESISTANCE A COURTS TERME	40
III.6.1	INFLUENCE DU RAPPORT EAU/CIMENT	40
III.6.2	INFLUENCE DU TYPE DE CIMENT	41
III.6.3	INFLUENCE DE LA TEMPERATURE	42
III.6.4	INFLUENCE DU POURCENTAGE DES ADDITIONS SUBSTITUE AU CIMENT	43
III.6.5	LES ACCELERATEURS DE PRISE ET DE DURCISSEMENT	47
	CONCLUSION	49
PARTIE 2: ETUDE EXPERIMENTALE		51
CHAPITRE I : IDENTIFICATION DES MATERIAUX		52
	INTRODUCTION	52
I.1	PRESENTATION GENERAL	53
I.2	ESSAI SUR LES GRANULATS	53
I.2.1	ECHANTILLONNAGE ET PRELEVEMENT (NF P 18-533)	53
I.2.2	ANALYSE GRANULOMETRIQUE (NF P 18-560)	54
I.2.3	ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES GRAVILLONS	57
I.2.4	ANALYSES GRANULOMETRIQUES DU SABLE	58
I.2.5	EXPRESSION DES RESULTATS	58
I.2.6	DETERMINATION DE LA PROPETE SUPERFICIELLE	60
I.2.7	DETERMINATION DES MASSES VOLUMIQUES ABSOLUES ET APPARENTES DES GRANULATS 68	
I.2.8	ESSAI DE RESISTANCE A L'USURE ET AU CHOC	70
I.2.9	CLASSIFICATION DES GRANULATS (XP P 18 – 540)	76
I.2.10	RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES	79
CHAPITRE II : FORMULATIONS DES BETONS		80
	INTRODUCTION	80
II.1	COMPOSITION DU BETON	81
II.2	QUELQUES METHODES DE COMPOSITION DE BETON	81
II.3	METHODE DE FAURY	81
II.4	TRACE DE LA COURBE DU MELANGE DES GRANULATS	86
	CONCLUSION	90
CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS		91
	INTRODUCTION	91
III.1	ESSAIS D'ETUDE	92
III.2	CONFECTION DES EPROUVETTES	92
III.3	ESSAIS SUR BETON FRAIS	95

III.4	ESSAIS SUR BETON DURCI	99
III.5	VERIFICATION EXPERIMENTALE DE LA RELATION DE BOLOMEY.....	105
	CONCLUSION	107
	CONCLUSION GENERALE.....	108
	REFERENCE BIBLIOGRAPHIE	111
	ANNEXE A.....	113
	ANNEXE B.....	115
	ANNEXE C.....	116

TABLE DES FIGURES

PARTIE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	16
Figure I.1: Les étapes de fabrication de ciment	20
Figure I.2 : Les différents types des granulats	21
Figure II.1: Micrographe en lumière réfléchie d'une section polie de clinker de ciment Portland	27
Figure II.2 : CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#), la porosité est repérée par (O)	29
Figure II.3 : Microscopie Electronique à Balayage, Ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton.....	30
Figure II.4: Courbe calorimétrique de l'hydratation d'un ciment Portland	32
Figure III.1 : Durcissement du béton représenté schématiquement par l'évolution de la Rc en fonction du temps	35
Figure III.2 : Influence de la température sur la résistance à la Compression	36
Figure III. 3 : L'évolution en fonction du temps de la température du béton au cœur et à la surface d'un poteau	37
Figure III. 4 : détermination de la courbe de référence d'un béton	39
Figure III.5.1 : Evolution de la RC des pâtes de ciment CEM I à 20°C.....	40
Figure III.5.2 : Evolution de la RC des pâtes de ciment CEM III à 20°C	40
Figure III.6.2 : Evolution de la RC des deux pâtes de ciment avec E/C=0,4 à 20°C..	42
Figure III.6.1 : Evolution de la RC des deux pâtes de ciment avec E/C =0,3 à 20°C.	42
Figure III.7 : Evolution de la Rc à 9 jours en fonction de la température	43
Figure III.8 : Variation de la Rc en fonction de l'âge	44
Figure III.9 : Développement de la Rc en fonction de l'âge	46
Figure III.10: Evolution de la Rc en fonction de l'âge des mortiers contenant la fumée de silice	47
Figure III .11: Influence d'un accélérateur de prise sur le temps de prise et la RC à court terme sur mortier normalisé conservé à 5 et 20°C.	48
PARTIE 2: ETUDE EXPERIMENTALE.....	51
Figure I.1: Opération de quartage	54
Figure I.2 : Colonnes de tamis	56
Figure I.3 : Analyses granulométrique du sable et graviers.	59

Figure I.4 : Equivalent de sable.....	63
Figure I.5 : Appareil nécessaire de l'essai au bleu	65
Figure I.6 : résultat de l'essai à la tache de fillers calcaire	67
Figure I.7 : résultat de l'essai à la tache de fillers siliceux	67
Figure I.8 : Mesure de la masse volumique absolue	68
Figure I.9 : Appareil de Micro-Deval	71
Figure I.10 : Appareil de Los Angeles	74
Figure II.1 Courbe de référence	83
Figure II.2 Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton.....	86
Figure III.1 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams	96
Figure III.2 Variation de l'affaissement en fonction de	96
Figure III.3 Evolution du volume d'air entraîné en fonction de différentes série du béton.....	98
Figure III.4 : Conservation des éprouvettes	99
Figure III.5 Evolution des masses volumiques en fonction du temps.....	100
Figure III.6 : Variation de la température des bétons en fonction du temps.....	102
Figure III.7 L'essai à la compression	104
Figure III.8 Résistance à la compression en fonction de différentes séries du béton.	104

TABLE DES TABLEAUX

PARTIE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	16
Tableau I.1: Classification des adjuvants	23
PARTIE 2 : ETUDE EXPERIMENTALE	51
Tableau I.1: Dimensions nominales des tamis.	55
Tableau I.2 : Analyses granulométriques du gravier 15/25.....	57
Tableau I.3 : Analyses granulométriques du gravier 8/15.....	57
Tableau I.4 : Analyses granulométriques du sable 0/3.....	58
Tableau I.5 : Teneur en impureté des graviers à 15/25 et 8/15.....	61
Tableau I.6 : Equivalent de sable	64
Tableau I.7 : Masse volumique absolue	69
Tableau I.8 : Masse volumique apparente.....	70
Tableau I.9 : Charge abrasive correspondant à chaque classe granulaire.....	72
Tableau I.10 : Mesure du coefficient « MDE » des granulats 8/15 et 15/25	72
Tableau I.11 : Charges des boulets correspondants à chaque classe granulaire.....	73
Tableau I.12 : Mesure du coefficient Los Angeles des granulats 15/25 et 8/15	75
Tableau I.13 : Récapitulatif de tous les résultats des essais	76
Tableau I.14 : Los Angeles.....	76
Tableau I.15 : Granularité des graviers.....	76
Tableau I.16 : Résultats sur la granularité des graviers	77
Tableau I.17 : Granularité du sable.....	77
Tableau I.18 : Résultats sur la granularité du sable.....	77
Tableau I.19 : Module de finesse	77
Tableau I.20 : Teneur en fines	78
Tableau I.21 : Propreté de sable ou valeur de bleu.....	78
Tableau I.22 : Analyse chimique du sable 0/3.....	79
Tableau II.1 : Qualités de divers paramètres en fonction soit de l'ouvrabilité, soit de la résistance recherchée pour un béton.....	81
Tableau II.2 : Valeurs de A selon la méthode de FAURY.	83
Tableau II.3 Les valeurs de K	84
Tableau II.4 : Valeurs des tamisats (%) de la courbe de mélange	86

Tableau II.5 : masse des composants pour 1 m ³ de béton.....	89
Tableau III.1 : Récapitulatif de la composition des gâchées	94
Tableau III.2 Variation de la température des bétons en fonction du temps.....	101
Tableau III.3 les valeurs de y en fonction de la consistance	106
Tableau III.4 les valeurs calculé pour chaque série du béton.....	106

NOTATIONS

RC : résistance à la compression.

NFP : Norme Française.

ESP : Equivalent de sable mesuré au piston.

ESV : Equivalent de Sable mesuré à Vue.

MDE : Micro Deval.

LA : Los Angeles.

VB : Valeur au Bleu.

LTP Est : Laboratoire des Travaux Publique Est

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dernières années, les entrepreneurs cherchent souvent à améliorer leur productivité sur site en écourtant les cycles de fabrication afin de décoffrer certaines parties d'ouvrages le plus rapidement possibles. Pratiquement, ceci se traduit par la recherche d'une valeur de la résistance à la compression du béton au jeune âge, quelles que soient les conditions climatiques.

Formuler un béton, pour une entreprise, c'est procurer aux chantiers une composition du béton capable de répondre non seulement aux exigences du maître d'œuvre et du bureau d'étude, mais également à la durabilité d'ouvrage. L'enjeu est, à la fois, technique et économique car la possibilité s'est diversifiée grâce à la variété des ciments, additions et adjuvants disponibles sur le marché.

Si l'entreprise décide de produire elle-même le béton, il faut alors choisir les constituants, définir éventuellement les moyens de produire un béton et de faire une prévision des résistances au jeune âge. L'entreprise a la responsabilité de la qualité et de la durabilité de ce qu'elle construit. La satisfaction du client, est son premier objectif avec le souci de respecter les délais contractuels. Mais l'entreprise a aussi un devoir essentiel, c'est celui de la prise en compte de l'économie. Elle doit respecter le coût de la construction de l'ouvrage sur lequel elle s'est engagée. C'est dans ce contexte que l'entreprise doit choisir ses matériaux et formuler son béton.

La résistance au jeune âge du béton mesurée sur des éprouvettes qui sont conservés en laboratoire ne subit pas du tout la même histoire de températures, que le béton dans l'ouvrage sur le chantier, ce qui peut conduire, à court terme, à des différences significatives de résistance. Actuellement, la prise en compte du double effet de la température et du temps sur la cinétique d'hydratation fait appel aux principes de maturité et de temps équivalent. La maturité et l'âge équivalent sont des notions complémentaires introduites pour quantifier l'état d'évolution des bétons en prenant en compte l'effet du couplage « temps – température ». Pour un béton donné, cette maturité dépend de la température à laquelle il a été soumis.

Le concept d'âge équivalent a été utilisé comme un moyen de prédiction de l'évolution des propriétés du béton et en particulier de sa résistance au jeune âge.

L'objectif principal de ce travail est de proposer la confection d'un béton ayant la meilleure résistance mécanique possible au jeune âge pour répondre aux impératifs de construction actuels qui est le décoffrage rapide. L'obtention de tels bétons nécessite des moyens tels que le choix des constituants (ciment, ajouts, adjuvants) et leurs dosages.

Dans le but d'améliorer les temps de prise et de durcissement du béton, ainsi sa résistance au jeune âge, nous avons voulu de comparer l'action de deux types de ciment dont le processus d'hydratation diffère sensiblement. Il s'agit du ciment portland composée, et le ciment aux laitier de haut fourneaux. Ainsi, étudier l'effet de la substitution d'une partie de ciment par des fillers calcaires et des fillers siliceux. En ce qui concerne les adjuvants, nous avons choisi un adjuvant plastifiant réducteur d'eau.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons partagé notre étude en deux parties ; la première partie concerne l'étude bibliographique qui est destiné dans le premier chapitre, aux rappels sur les constituants du béton et le processus de sa préparation, dans le deuxième chapitre nous présenterons le processus d'hydratation du ciment et les différentes réactions chimiques, le dernier chapitre dans cette partie est destiné à illustrés les différents paramètres influant sur les résistances à court terme du béton, et proposerons le concept d'âge équivalent comme moyen de connaître la résistance du béton dans l'ouvrage. Ensuite, nous présenterons des données expérimentales de nombreuses recherches sur les moyens de régler la résistance à court terme du béton.

Dans la seconde partie, qui est l'étude expérimentale, nous avons commencé par la définition des caractéristiques des différents matériaux entrants dans la composition des bétons. Le deuxième chapitre consacré à l'étude de la formulation des bétons qui consiste à définir les pourcentages des différents granulats, ainsi les dosages en eau et en ciment selon la méthode de Faury. Le troisième chapitre, débute par une présentation des différents composants de nos mélanges, puis une présentation des résultats et leurs interprétations. Enfin, une conclusion générale reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude.

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

I. LES CONSTITUANTS DU BETON

II. HYDRATATION DU CIMENT

III. RESISTANCE A COURT TERME DU BETON

CHAPITRE I

CONSTITUANTS DU BETON

INTRODUCTION

Le béton comme matériau le plus utilisé dans la construction, permet de réaliser des structures technologiques telles que les barrages, ponts, immeuble, tunnels, centrales nucléaires. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance à la compression et au feu, sa durabilité, son faible cout et d'autres qualités. Les origines de béton remontent à la plus haute antiquité, mais c'est au XX^{eme} siecle que l'utilisation de beton se généralise auxdépens de l'acier et de maçonnerie. Aujourd'hui, le béton doit répondre à un ensemble de spécifications très précises qui sont la résistance au jeune âge, la résistance à 28 jours et la durabilité etc.

I.1 COMPOSITION DU BETON

Le béton est un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Composé essentiellement de granulats (gravier, sable et filler), de ciment, d'eau de gâchage et d'adjuvants pour améliorer ou acquérir certaines caractéristiques ou propriétés pour faire face à des situations bien définies. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange. Dans ce chapitre, on étudiera l'identification des matériaux constitutifs du béton, et leur conformité aux normes correspondantes.

I.1.1 Le ciment

Les ciments sont des poudres fines obtenues par cuisson à haute température (1450°C) et broyage d'un mélange minéral (calcaire + argile en général). Lorsqu'ils sont mélangés à l'eau, ils forment une pâte susceptible de faire prise et de durcir grâce à une réaction d'hydratation en général exothermique. [1]

I.1.1.1 Les Constituants du ciment : [2,3]

Le ciment 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:

a) Calcaires

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

b) 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 du laitier fondu provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau

c) Cendres volantes (V ou W)

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

♦ Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques :
Constituées essentiellement de silice (SiO_2) réactive et l'alumine (Al_2O_3), ainsi que l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres composants.

♦ Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

d) Les fumées de silices

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 μm). 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.

e) 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).

f) Additifs

Ce sont les constituants qui ne figurent pas dans les points cités précédemment, et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment, La quantité totale de tels additifs ne devrait pas dépasser 1 % en masse du ciment. Dans le cas contraire, la quantité doit être mentionnée sur les emballages et/ou les bons de livraison. Ces additifs ne doivent pas favoriser la corrosion des armatures ou influencer défavorablement sur les propriétés du mortier et du béton fabriqués avec ce ciment.

I.1.1.2 Les étapes de fabrication du ciment

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Fe_2O_3 , l'oxyde ferrique.

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant: calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker. Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au-delà de 100 °C, le départ d'eau d'avantage liée. A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique (CO₂) et en chaux (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO₃). Le mélange est porté à 1450-1550 °C, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. Les composants du ciment sont formés de la façon suivante: une partie de CaO est retenue par Al₂O₃ et Fe₂O₃ en formant une masse liquide. SiO₂ et CaO restant réagissent pour donner le silicate bicalcique dont une partie qui se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné. [2]

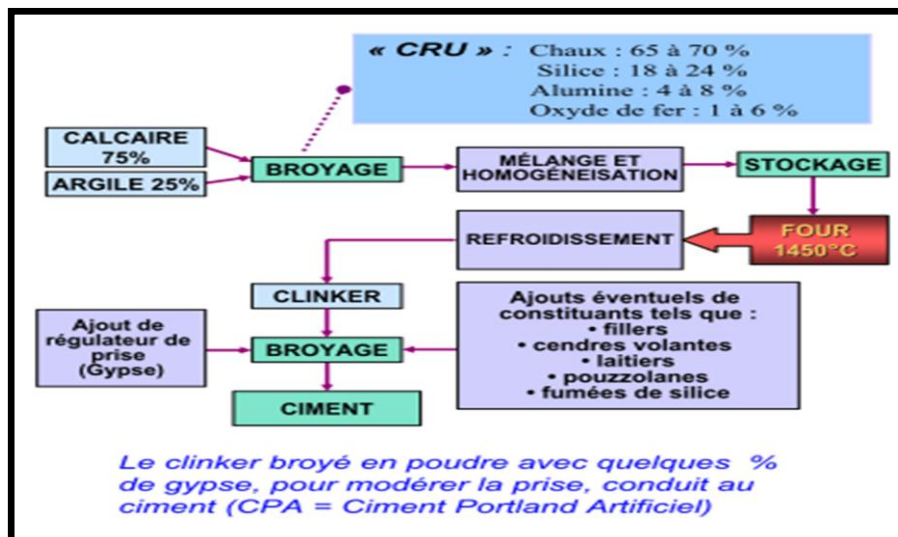


Figure I.1: Les étapes de fabrication de ciment [4]

I.1.1.3 Les différents Types de ciment

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne [2].

- Ciment portland,
- Ciment portland composé,
- Ciment de haut fourneau,
- Ciment pouzzolaniques,
- Ciment au laitier et aux cendres.

I.1.2 Les granulats

I.1.2.1 Définition

On appelle "granulats" les matériaux qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 50mm dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Ils sont dits naturels lorsqu'ils sont extraits de leurs sites géologiques d'origine en ayant subi que des traitements mécaniques (granulats alluvionnaire ou de carrière). Les granulats artificiels sont obtenus de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais. [8]



Figure I.2 : Les différents types des granulats [9]

I.1.2.1 Classe des granulats

Les granulats sont classés selon les normes en fonction de leur grosseur. On désigne par d/D ($0/D$ pour les sables) la classe d'un granulat dont la dimension des grains s'étale de d pour les plus petits à D pour les plus gros.

Les définitions des classes granulaires avec leurs caractéristiques, données par la norme française XP P 18-540 [8] sont :

- Fines $0/D$ pour $D < 2$ mm avec au moins 70% de passant à 0,063 mm ;
- Sablon $0/D$ $D \leq 1$ mm avec au moins 70% de passant à 0,063 mm ;
- Sable $0/D$ $1 < D \leq 6,3$ mm
- Graves $0/D$ $D > 6,3$ mm
- Gravillons d/D $d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm
- Ballast $d \geq 20$ mm et $D \leq 50$ mm

D'après la norme les caractéristiques essentielles des granulats destinés aux bétons hydrauliques sont les suivantes [9,10] pour :

a) Le gravier : grains de dimensions allant de 1 à 25mm, d'après la norme P18-591, l'essai de propreté des graviers consiste à déterminer le pourcentage d'éléments <0,5mm, le pourcentage de vase et argiles, éliminées lors de l'essai doit être $\leq 1,5\%$ pour gravillons n'ayant pas subi de concassage, et $\leq 3\%$ pour ce qui ont subi le concassage. La granularité du gravier est fixée par D prescrit ou admissible pour le béton à préparer, l'absorption d'eau selon la norme NF P18-541 fixe à 5% la valeur maximale pour les bétons hydrauliques

b) Le sable : Ces grains de sable, de même origine que les granulats, ont un diamètre inférieur à 5 mm. Le sable doit être propre et sans poussières argileuses. Il existe un béton contenant uniquement du sable, du ciment et de l'eau.

Le mortier sert principalement en maçonnerie pour lier les briques ou les parpaings, et pour dresser les enduits sur les murs.

c) les fillers : grains de dimensions allant de 0 à D ou $D < 2\text{mm}$ avec au moins 70% de passant à 0,063 mm d'après la norme XP P 18-540

I.1.3 Les adjuvants [7]

Les adjuvants sont ajoutés au béton selon un dosage n'excédant pas 5% de la masse totale de ciment, soit au cours du malaxage, soit la mise en œuvre du béton, est ceci dans le but de le modifier ou d'améliorer certaines de ses propriétés.

I.1.3.1 Les différents types des adjuvants

Les adjuvants sont constitués de molécules organiques. Ils sont ajoutés au béton lors du malaxage. Par leur action chimique ou physique, ces substances modifient certaines propriétés du béton frais ou du béton durci comme par exemple l'ouvrabilité, la prise, le durcissement ou la résistance au gel.

Tableau I.1: Classification des adjuvants [11]

Adjuvants	Effets principaux
Plastifiants	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution du rapport E/C et/ou amélioration d'ouvrabilité • Augmentation des résistances mécaniques • Défloculation des grains de ciment
Superplastifiants (ou « fluidifiants »)	<ul style="list-style-type: none"> • Forte réduction du rapport E/C et/ou fort allongement des temps d'ouvrabilité • Forte augmentation des résistances mécaniques • Défloculation des grains de ciment • Fluidification des bétons
Accélérateurs de prise ou de durcissement	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation hivernale des bétons • Accroissement de la vitesse de montée en résistance des bétons • Réduction des temps de prise des bétons
Retardateurs de prise	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation des bétons en été • Accroissement des temps d'ouvrabilité et des temps de prise • Régulation de la chaleur d'hydratation
Entraîneurs d'air	<ul style="list-style-type: none"> • Protection des bétons contre les actions du gel et des sels de par création d'un réseau de micro bulle d'air.
Hydrofuges	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de la capillarité et de l'absorption capillaire des bétons • Renforcement de « l'étanchéité » des bétons • Possibilité de réduire certaines efflorescences

I.1.4 Eau de gâchage [5]

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher du béton par ce qu'elles contiennent, dans certains cas, un excès d'impuretés qui détériore les propriétés du béton, notamment les propriétés physiques et mécaniques (prise et résistance), les propriétés esthétiques (taches ,efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures, stabilité du béton). Ces impuretés, éventuellement contenues dans l'eau de gâchage, sont soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis-à-vis du ciment ,des granulats ou des armatures, soit des particules en suspension qui, du fait de leur quantité ou de leur qualité, sont indésirables.

I.1.5 Les additions [6]

Sont des matériaux en fines particules qui peuvent être ajoutés en quantités limitées pour influencer certaines propriétés ou obtenir des propriétés particulières. Ils sont à prendre en compte dans la composition volumétrique.

I.1.5.1 Cendre volantes

Les cendres volantes sont un sous-produit industriel récupéré dans les dépoussiéreurs de cheminée des centrales thermiques fonctionnant au charbon pulvérisé ou au lignite. Cette poudre sous forme finement divisée et est constituée de particules vitreuses et sphériques. Ayant des propriétés pouzzolaniques et composées essentiellement de silice et d'alumine (SiO_2 et Al_2O_3), la proportion de silice (SiO_2) réactive constituant au moins 25% en masse.

I.1.5.2 Fillers et additions calcaires

Les données économiques ne faisant pas de distinction entre les fillers et les additions qui relèvent pourtant de normes différentes, nous utilisons ci-après le terme de (fillers) pour désigner l'ensemble de la production.

I.1.5.3 Laitier

C'est un produit de la production de la fonte. Dans le procédé de fabrication, dans les hauts fourneaux, le laitier surnage au-dessus de la fonte, et se vérifie rapidement après refroidissement. Le broyage de ce dernier donne ce qu'on appelle le laitier vérifié moulu.

I.1.5.4 Fumée de silice

C'est une poudre amorphe de silice extrêmement fine, récupérée dans les cheminées lors de la condensation des gaz de réaction résultant de la fabrication du silicium ou de ses alliages.

CONCLUSION

Le béton est matériau formé par un mélange de ciment, de sable, de gravillon et d'eau, et éventuellement d'adjuvants et d'additions, chacun de ces constituants joue un rôle différent dans le comportement du béton frais, pendant la prise et le durcissement. Les ciments courants offrent une large gamme de possibilités par le choix de leur classe (résistance mécanique) et par leur type (meilleur environnement). Les granulats constituent la phase dominante du béton, dont ils occupent environ 70% du volume. La sélection et le dosage des différentes fractions granulaires sont un aspect essentiel pour l'obtention d'un béton satisfaisant. Ils doivent être propres et de bonnes résistances mécaniques.

CHAPITRE II

HYDRATATION DU CIMENT

INTRODUCTION

Les réactions du ciment portland en présence d'eau ou "hydratation" produisent des composés hydratés qui permettent de lier les différentes particules de ciment et de granulat ce qui confère au béton ces qualités de résistance mécanique. Ces réactions s'accompagnent d'effets secondaires qui peuvent produire des dégradations du matériau lorsqu'ils ne sont pas pris en compte. L'un de ces effets est la chaleur dégagée lors de ces réactions d'hydratation dont la grandeur dépend de la composition du ciment. Ces propriétés liées aux réactions d'hydratation doivent permettre de pouvoir travailler le produit béton jusqu'à sa mise en forme. Elles doivent aussi permettre au produit de durcir dans un temps suffisamment court pour pouvoir poursuivre les travaux de construction.

II.1 HYDRATATION

Les composés principaux formés dans le ciment et qui confèrent les propriétés de prise et de résistance sont les silicates de calcium, $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ et $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$. Lorsqu'on les mélange avec l'eau, ces composés anhydres s'hydratent et durcissent lentement en suivant le comportement bien connu du ciment.

L'aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$, forme aussi un hydrate avec l'eau; bien qu'il contribue aux propriétés de prise et de durcissement. Comme le cas se présente pour la plupart des réactions chimiques, le taux d'hydratation, et par suite le gain de résistance, augmente en même temps que la température. On utilise souvent, spécialement par temps très chaud, un adjuvant retardateur pour modifier la durée de prise. Les adjuvants accélérateurs non seulement affectent la durée de prise du béton, mais aussi servent principalement à augmenter la vitesse de gain de résistance en accroissant la vitesse d'hydratation. [12]

II.2 LA PRISE

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte avec échauffement; on le détermine à l'aide de l'aiguille de Vicat. Les temps de début de prise peuvent varier de quelques minutes, pour les ciments prompts, à plusieurs heures pour les ciments à prise lente. Pour la plupart des ciments courants, le début de prise à 20°C se situe entre 2 et 5 heures.

II.3 DURCISSEMENT

Après la prise, le phénomène d'hydratation se poursuit; c'est la période de durcissement. Elle est beaucoup plus longue. Pour les ciments à durcissement rapide on obtient après quelques jours la presque totalité de la résistance, mais pour d'autres ciments le durcissement se poursuit pendant des mois.

II.4 COMPOSITION DU CIMENT PORTLAND [14]

Les ciments commerciaux sont issus du mélange du clinker broyé et du gypse. Les 4 composés minéralogiques principaux du clinker sont :

- les silicates :
 - Tricalciques : $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ou C_3S (50 à 70%)
 - Bicalciques: $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ou C_2S (20 à 25 %)
- les aluminates :
 - Tricalciques: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A (5 à 15 %)
 - Ferroaluminate tétracalcique: $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ou C_4AF (2 à 16 %)

Une photo de clinker de ciment portland avec les différentes phases qui le composent est présentée à la Figure II.1. On retrouve également dans le clinker des sulfates alcalins et de la chaux libre. À la sortie du four, le clinker est ensuite mélangé avec une quantité de gypse (teneur maximale de 5%) pour être broyé. Les différents types de ciment sur le marché se distinguent principalement par leurs proportions en silicates et en aluminates.

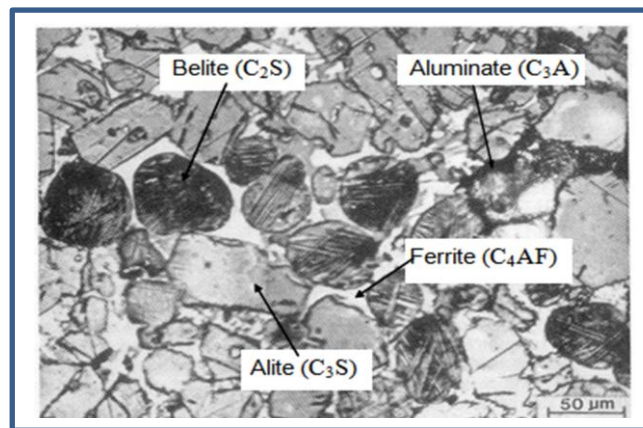


Figure II.1: Micrographe en lumière réfléchie d'une section polie de clinker de ciment Portland [14]

La taille et la forme des grains de ciment influencent beaucoup son hydratation. Le broyage du clinker permet d'obtenir des particules fines mais de forme angulaire, Plus un ciment est fin, plus sa surface spécifique est grande, ce qui permettra alors d'augmenter sa réaction avec l'eau. Dans un ciment Portland ordinaire, on retrouve :

- De 7 à 9 % de grains très fins de diamètres inférieurs à $2\mu\text{m}$
- De 0 à 4% de grains grossiers de diamètres supérieurs à $90\mu\text{m}$

II.5 HYDRATATION DES COMPOSANTS DU CIMENT

Lorsque le ciment entre en contact avec l'eau, une réaction exothermique instantanée se produit avec une forte libération de chaleur, cette période dite de pré-induction est de courte durée (10-20 minutes). Elle est suivie d'une période relative inactivée appelée période d'induction ou période dormante au cours de laquelle le dégagement de chaleur est faible, mais jamais nul. La durée de cette période peut varier entre 2 et 8 heures.

La période d'induction est très importante quant à l'ouvrabilité des bétons et mortiers, car à sa fin s'amorce la prise du ciment avec un fort dégagement de chaleur qui correspond à la période d'accélération associée au début de prise et de durcissement du ciment. Pour comprendre les changements chimiques et physiques qui se produisent au cours de l'hydratation du ciment portland, il est essentiel d'étudier séparément les réactions des silicates et des aluminates.

a. Hydratation du silicate tricalcique C₃S [14]

L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté et l'hydroxyde de calcium. La réaction du C₃S avec de l'eau est la suivante:



Où CSH représente le 3CaO.2Si₂O₅. 3H₂O (Silicate de calcium hydraté) et CH représente le Ca(OH)₂ (Portlandite).

Les hydrates ainsi obtenus au cours de l'hydratation du C₃S (figure II.2) sont:

- ♦ les silicates de calcium hydratés (CSH) qui occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils ont une structure en feuillets formées de cristaux très petits et mal cristallisés. La surface spécifique est très élevée (100 - 700 m²/g).

- ♦ L'autre composant principal dans l'hydratation des silicates tricalciques est l'hydroxyde de calcium CH (ou Portlandite) qui occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate.

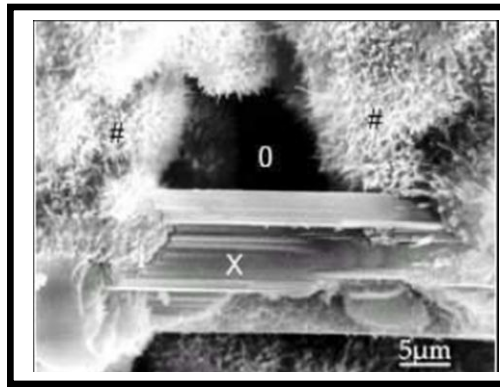
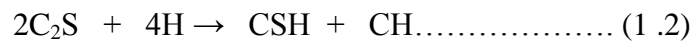


Figure II.2 : CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#), la porosité est repérée par (O) [14]

b. Hydratation du silicate bi calcique C₂S

Une fois hydraté, C₂S donne aussi des CSH. La réaction est donnée par:

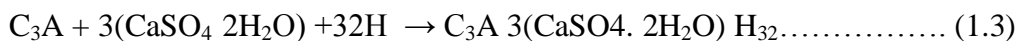


Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C₃S mais avec moins d'évolution de la chaleur. L'hydratation de C₃S produirait 61% de gel de CSH et 39% de CH alors que l'hydratation de C₂S produirait 82% de gel de CSH et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C₂S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C₃S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée.

c. Hydratation de l'aluminate tricalcique C₃A

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse (CaSO₄ · 2H₂O). En l'absence du gypse, la réaction de C₃A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C₃A réagissent d'abord pour former l'Ettringite hydraté qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale (Figure II.4).

La réaction est donnée par:



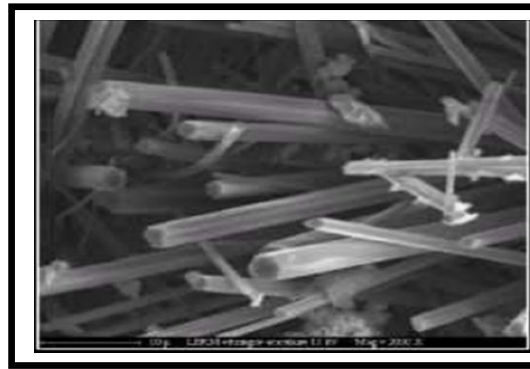
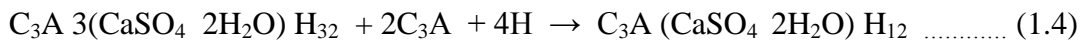


Figure II.3 : Microscopie Electronique à Balayage, Ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton. [14]

Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en ettringite. Il apparaît donc secondairement un mono sulfoaluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales. La réaction est donnée par:



Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée.

d. Hydratation de l'aluminoferrite tétra calcique C₄AF

Le C₄AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C₃A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente. Dans la première étape de la réaction, le C₄AF produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C₄AF pour donner une basse forme de sulfoaluminate. Ces sulfoaluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte. La réaction du C₄AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance. L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

➤ La résistance mécanique du ciment [13]

L'aluminate tricalcique C₃S, en présence des autres minéraux du clinker, favorise la croissance rapide de la résistance pendant les premiers jours de durcissement. L'aluminoferrite tétra-calcique se comporte assez activement pendant le durcissement.

Les facteurs technologiques pour leur part, ont de l'influence sur la résistance mécanique, parmi ces facteurs, on distingue :

- Le rapport E/C, plus ce rapport est petit, plus la vitesse de croissance ainsi que la résistance finale sont grandes.

- La finesse de mouture des ciments qui est un facteur technologique caractérisée par sa surface spécifique ou surface développée des grains contenus dans une masse donnée. A une augmentation de finesse correspond une augmentation des résistances précoces (2 et 7 jours).

II.6 EVOLUTION DE L'HYDRATATION [16]

L'hydratation des ciments Portland est un phénomène complexe mettant en jeu des réactions chimiques entre les composants du ciment et l'eau de gâchage. Ce processus physico-chimique est à l'origine de la prise et du durcissement de la matrice cimentaire.

Les réactions d'hydratation s'accompagnent d'un dégagement de chaleur qui peut être mesuré par calorimétrie. La chaleur dégagée donne alors une indication sur l'avancement du processus d'hydratation. **A. pertué [16]** résume dans son étude bibliographique l'évolution du flux de chaleur qui peut être divisée en cinq parties présentées à la figure II.5

➤ Etape 1

Dès que le ciment entre en contact avec l'eau, la dissolution partielle des grains anhydres engendre un premier pic important de dégagement de chaleur. Les réactions entre le C_3S , le C_3A et l'eau commencent et génèrent également un dégagement important et rapide de chaleur. Il se forme alors des C-S-H et de l'ettringite. La durée de cette période est très courte, environ 10 minutes.

➤ Etape 2

Cette phase est appelée "*période dormante*". Elle correspond à un dégagement de chaleur relativement faible, bien que non nul. Durant cette période, des ions Ca^{2+} et OH^- sont libérés. Ceci augmente alors le PH de la solution jusqu'à environ 12,5 et ralentit la dissolution des constituants. Le dégagement de chaleur est alors faible. Les transformations physiques durant cette période sont détectées par l'augmentation du de la pâte.

➤ Etape 3

Cette étape met fin à la période dormante. Il se produit alors une accélération du dégagement de chaleur. Ce dégagement atteint un pic généralement entre 9 et 10 heures pour une pâte de ciment Portland conservée à 20°C. Cette phase débute lorsque la concentration de la solution en ions Ca^{2+} et OH^- devient critique. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (C-S-H) et des phases cristallines (Principalement portlandite et ettringite). Cette grande activité chimique dégage beaucoup de chaleur, augmentant la température du matériau. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et permettent alors la formation d'un solide rigide.

➤ Etape 4

On assiste à une décélération de la réaction d'hydratation du C_3S .

La couche d'hydrates s'épaissit autour des grains anhydres et rend plus difficile les échanges ioniques. Les réactions de précipitation dissolution sont alors progressivement remplacées par un processus diffusionnel.

➤ Etape 5

Cette dernière période, dite de réaction lente, correspond à un dégagement de chaleur faible et décroissant (non nul) mais continu. Le système réagit lentement et les réactions d'hydratation se déroulent uniquement par un processus diffusionnel, pendant des mois, voire des années.

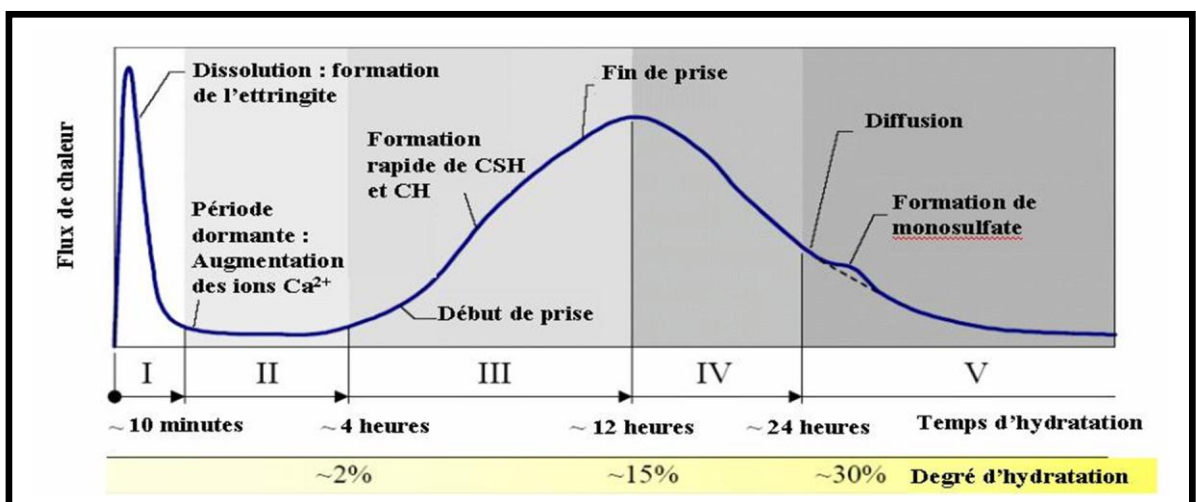


Figure II.4: Courbe calorimétrique de l'hydratation d'un ciment Portland [16]

CONCLUSION

La réaction d'hydratation du ciment combine les réactions d'hydratation des principaux composants du clinker et, éventuellement, celles de ses composants secondaires.

Cependant, les réactions sont plus complexes du fait des interactions chimiques et thermiques qui se produisent au cours du processus d'hydratation et du fait des impuretés présentes dans la solution solide qui influencent beaucoup l'hydratation de chaque phase.

CHAPITRE III

RESISTANCE A COURT TERME DU BETON

INTRODUCTION

Le développement des résistances à court terme d'un béton donné dépend essentiellement de l'histoire des températures. Celle-ci est la résultante des conditions climatique et de la géométrie de l'ouvrage. Dans ces conditions, il est clair que la résistance à court terme, mesurée sur des éprouvettes normalisée, n'est généralement pas représentative de la résistance du béton dans l'ouvrage. Le concept d'âge équivalent permet de prendre en compte le couplage temps-températures sur la cinétique d'hydratation du ciment, par conséquent, constitue un moyen d'estimée avec une précision satisfaisante la résistance réelle atteinte par le béton dans l'ouvrage.

Nous représenterons dans ce chapitre, l'influence de la température sur la résistance à court terme du béton et proposant le concept d'âge équivalent comme un moyen de connaître la résistance du béton dans l'ouvrage. Ensuite, nous présenterons des données expérimentales sur les moyens de régler la résistance à court terme du béton.

III.1 Définition de la notion de « court terme »

Les propriétés du béton évoluent en fonction de l'état d'avancement de la réaction d'hydratation du ciment. La figure III.1 représente schématiquement le processus de durcissement du béton et les différentes phases de la vie du béton.

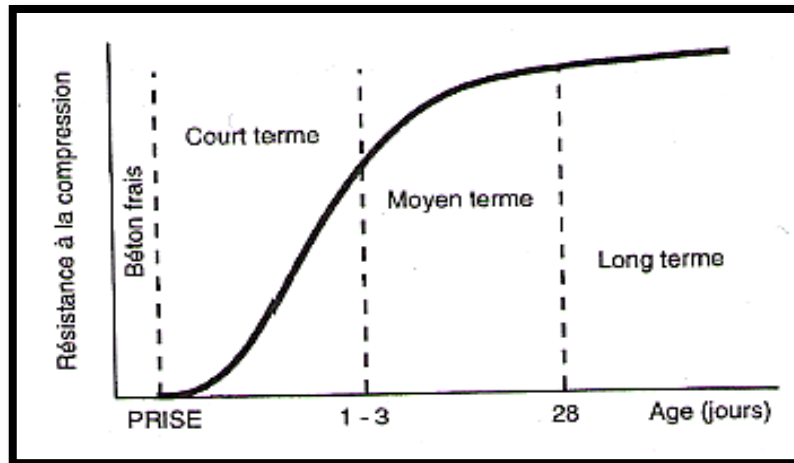


Figure III.1 : Durcissement du béton représenté schématiquement par l'évolution de la Rc en fonction du temps [5]

La période appelée «court terme» démarre à l'instant où la prise du béton commence. Elle est caractérisée par une grande activité chimique qui se traduit par une croissance rapide correspondant au moment du décoffrage.

III.2 Influence de la température sur la résistance à court terme du béton [20]

De nombreuses études ont montré que plus la température de fabrication et/ou de mûrissement est élevée, plus la résistance à court terme est élevée. Alors qu'à long terme, l'influence de la température est inversée, c'est-à-dire que plus la température initiale est élevée, moins bonnes sur les résistances.

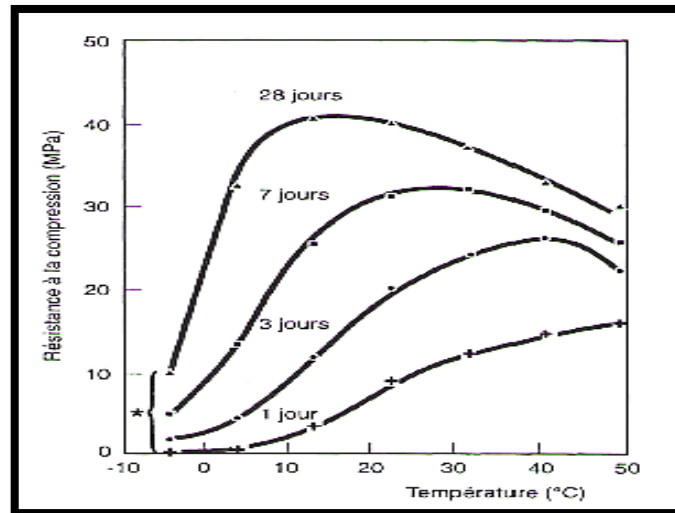


Figure III.2 : Influence de la température sur la résistance à la Compression [5]

La figure III.2 montre que plus la température de fabrication du béton est élevée plus la résistance à un jour de ce béton est élevée, alors que pour les âges de trois à vingt-huit jours l'influence de la température change radicalement. En effet, pour chacun des âges étudiés à partir de trois jours, il existe une température optimale laquelle correspond le maximum de résistance. En fait, cette température optimale diminue lorsque l'échéance considérée augmente.

L'augmentation des résistances du béton à court terme s'explique par le fait que l'hydratation du ciment est une réaction thermo-activée. Ceci signifie que la vitesse à laquelle se fait cette réaction chimique croît avec la température.

De façon générale, la température subie par le béton au jeune âge peut :

- ◆ Etre imposé à celui-ci par une chaleur extérieure, c'est à dire en lui faisant subir un traitement thermique. Dans ce cas, des températures élevées peuvent être atteintes dans des éléments, quelles soit leurs dimensions.

- ◆ Etre provoquée par la réaction d'hydratation du ciment. En effet, dans certaines conditions, la seule chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment peut conduire à des élévations de températures dans le béton qui se produisent dans les éléments de dimensions importantes.

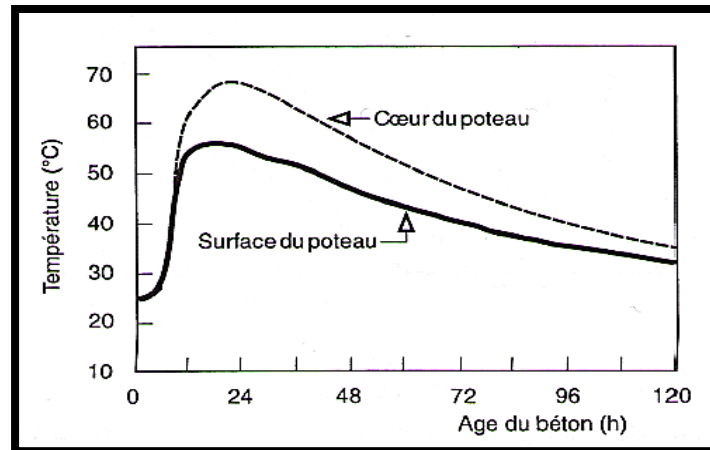


Figure III. 3 : L'évolution en fonction du temps de la température du béton au cœur et à la surface d'un poteau [5]

La figure III.3 montre que le béton au cœur du poteau atteint une température maximale de 68°C. A la surface du poteau, la température maximale atteinte par le béton a été de 56°C, (le poteau d'une section de 1mx1m et de deux mètre de hauteur). Donc les résistances à court terme du béton au cœur et à la surface du poteau ne seront nécessairement pas les mêmes. L'évolution à court terme des résistances du béton ne sera pas la même dans le poteau que celle mesurée sur les éprouvettes normalisées conservées au pied du poteau ou dans les conditions normalisées. En effet, le béton de ces éprouvettes normalisées ne s'échauffera jamais de façon aussi importante que celui mis en œuvre dans le poteau.

III.3 Le concept d'âge équivalent [17]

Par définition le temps équivalent correspond au temps durant lequel on doit laisser le « mélange béton » à la température de référence pour obtenir la même valeur de maturité. Le temps équivalent est donc en quelque sorte la représentation du degré de durcissement du béton et de l'état d'avancement des réactions d'hydratation.

Le développement de la résistance du béton à court terme pouvant être considéré comme un système à variables séparées (temps, température) la maturité à l'âge réel (t) d'un béton subissant une histoire de températures $\theta(t)$ peut être exprimée par un âge équivalent (t_e) défini à une température de référence fixée (θ_r) :

$$f_c(\theta_r, t_e) = f_c(\theta(t), t)$$

Plusieurs fonctions de maturité ont été proposées pour décrire l'activation de la réaction d'hydratation du ciment par la température, il s'agit de la loi d'Arrhenius et de

la fonction de Nurse-Saul. Pour une température de référence de 20°C, l'âge équivalent donné par la loi d'Arrhenius est suivante :

$$t_{\text{eq}} = \int_0^t \exp\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{réf}}}\right)\right) d\tau = \int_0^t \exp\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + \theta}\right)\right) d\tau$$

t_{eq} : âge équivalent

R : constante des gaz parfaits, 8,314 J/mol K,

E_a : énergie d'activation apparente du béton, J/mol.

θ : température du béton à l'instant t en °C.

t : âge réel.

L'âge équivalent est donné sur la loi d'Arrhenius la plus appropriée pour prendre en compte, à court terme, l'influence de la température sur l'avancement de l'hydratation. Le développement de la résistance du béton dépend de l'évolution de sa température. La résistance à un âge donné ne dépend donc pas seulement de l'instant considéré. La notion d'âge équivalent permet de rendre compte de l'influence de la température: c'est le temps que mettrait le béton pour atteindre la même résistance après un mûrissement à 20°C. Aux jeunes âges, le calcul de l'âge équivalent est basé sur la loi d'Arrhenius.

III.4 Le paramètre énergie d'activation apparente du béton [5]

La loi d'Arrhenius fait intervenir le paramètre E_a , énergie d'activation qui caractérise la réaction d'hydratation qui se produit au sein du béton. Dans le cas du béton, il est préférable de parler d'une énergie d'activation apparente car les divers constituants du ciment ont des réactions d'hydratation simultanées qui ont chacune leur propre énergie d'activation.

L'énergie d'activation apparente d'un béton dépend du ciment utilisé (composition chimique, finesse), du rapport E/C, de la nature et de la quantité des additions minérales et des adjuvants utilisés. C'est pourquoi il est nécessaire de déterminer l'énergie d'activation apparente du béton proprement dit et de ne pas se limiter uniquement à celle du ciment.

On peut déterminer l'énergie d'activation apparente d'un béton E_a , pour différentes températures de mûrissement, à partir de l'avancement des réactions d'hydratations ou à partir de grandeurs en relation avec cet avancement, par exemple, la résistance à la compression.

III.5 Principes d'utilisation du concept d'âge équivalent pour l'estimation de la résistance du béton [5]

La courbe de référence exprime la variation de la résistance d'un béton en fonction de son âge équivalent. Connaissant l'énergie d'activation apparente du béton et sa courbe de référence, il est possible d'estimer la résistance de ce béton quelle que soit son histoire de températures.

L'utilisation du concept d'âge équivalent permet d'exprimer l'évolution de la résistance d'un béton en fonction d'un paramètre temporel indépendant de la température et d'obtenir ainsi une caractéristique intrinsèque.

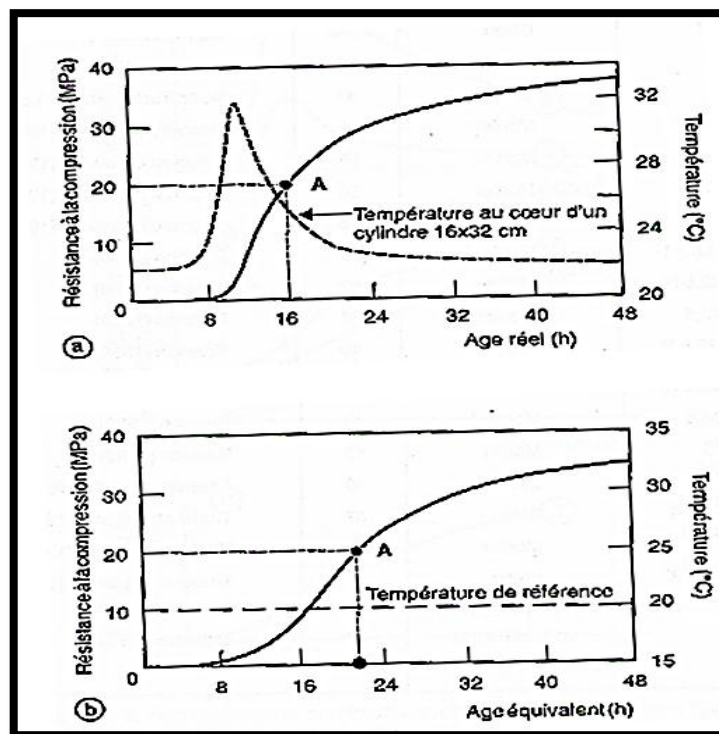


Figure III. 4 : détermination de la courbe de référence d'un béton [5]

De façon générale la courbe de référence est définie en réalisant à, différentes échéances, des mesures de résistance sur des éprouvettes normalisées conservées à 20°C. Un suivi thermique du béton de ces éprouvettes permet de calculer, à la température de référence désirée, un âge équivalent de ce béton pour chacune des échéances de rupture (Figure. III 4).

Cette opération nécessite la connaissance de l'énergie d'activation apparente du béton. Connaissant l'énergie d'activation apparente et la courbe de référence du béton étudié, le concept d'âge équivalent permet d'évaluer la résistance du béton $f_c(t)$ à

l'instant t par la seule connaissance de son passé thermique. Pour cela, il faut calculer l'âge équivalent t_e du béton et se rapporter à sa courbe de référence $f(t_e)$. La figure III.4 donne un exemple illustrant le principe d'utilisation du concept d'âge équivalent pour l'estimation de la résistance du béton dans l'ouvrage.

III.6 LES MOYENS PERMETTANT DE REGLER LA RESISTANCE A COURTS TERME

III.6.1 Influence du rapport Eau/Ciment

La résistance est en relation directe avec la porosité de la pâte de ciment, cette porosité résultant principalement de la valeur du rapport E/C. Ainsi, la résistance à la compression est directement liée au rapport E/C. [5]

Selon la recherche de A.PERTUE [16] Les figures III.5.1 et III.5.2 présentent l'évolution de la résistance à la compression des pâtes de ciment CEMI et CEMIII en fonction du rapport Eau/Ciment à 20°C. Pour les deux types de ciment, on constate que plus le type de ciment, que plus la quantité d'eau de gâchage est importante, plus la résistance en compression est faible. Le rapport E/C exerce une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydratée car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage (Chenet *et al.*, 2007). Plus le rapport Eau/Ciment est faible, plus la porosité diminue. Ceci se traduit directement par une augmentation des propriétés mécaniques de la matrice cimentaire, quel que soit le type de ciment considéré.

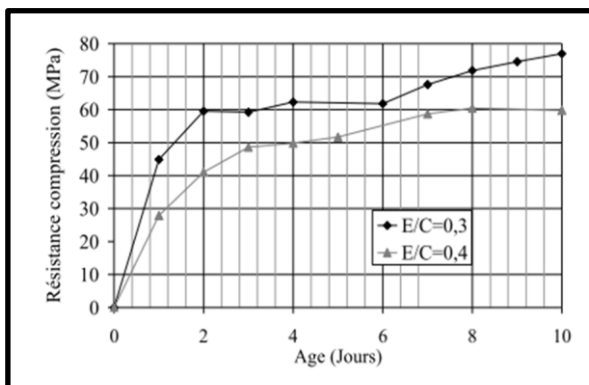


Figure III.5.1 : Evolution de la RC des pâtes de ciment CEM I à 20°C

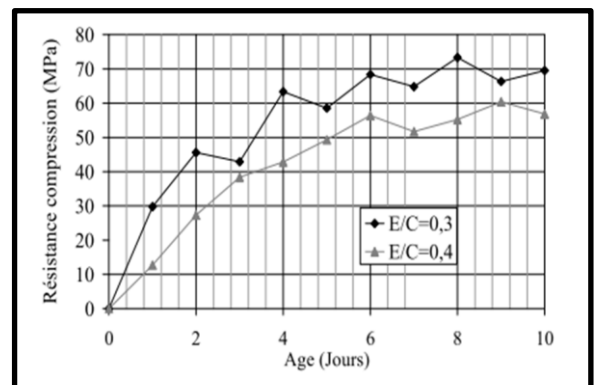


Figure III.5.2 : Evolution de la RC des pâtes de ciment CEM III à 20°C

III.6.2 Influence du type de ciment [16]

La démarche de formulation d'un béton passe par le choix du ciment : son type (Ciments portland, portland composé, de haut fourneau, pouzzolaniques, au laitier et aux cendres), sa classe et sa résistance au jeune âge qui peut être soit ordinaire, soit élevé. [5]

La présence du laitier d'après **A.PERTUE [16]** ; a un effet important sur l'évolution de la résistance en compression. Les figures III.6.1 et III.6.2 montrent l'évolution de la résistance des pâtes de ciment de rapports $E/C=0,30$ et $E/C=0,40$, respectivement.

A.PERTUE [16] a constaté que durant les premiers jours, la résistance évolue moins rapidement pour le CEM III. En effet la résistance à 1 jour pour le CEM III est égale à 66% de la résistance obtenue avec le CEM I pour un rapport Eau/Ciment de 0,3 et de 50% pour un rapport Eau/Ciment de 0,4. Ce type de phénomène caractérise les liants à base de laitiers de haut fourneau, dont l'hydratation est plus lente que celle des ciments Portland. L'influence de la présence de laitier sur le développement des résistances mécaniques dépend du degré de réaction du liant. **A.PERTUE [16]** ; dit aussi que l'évolution de la courbe de chaleur d'hydratation du ciment au laitier est moins importante que celle d'un ciment Portland et que le pic de dégagement de chaleur est légèrement décalé dans le temps. Cette différence de cinétique d'hydratation explique que l'évolution de la résistance en compression d'un ciment à base de laitier soit plus faible au jeune âge. Ce phénomène a également été relevé dans les travaux de Chen (Chen, 2007, Chen *et al.*, 2007) sur l'hydratation des ciments aux laitiers.

Par ailleurs, Pandey *et al.* (Pandey *et al.*, 2000) ont constaté dans le cadre de leur travail sur l'influence des additions sur la résistance des mortiers, que la porosité totale est plus importante durant les premières heures d'hydratation avec un ciment à base de laitiers qu'avec un ciment Portland. A plus long terme, la porosité du mortier à base de laitier devient légèrement plus faible que celle du mortier réalisé avec un ciment Portland. Barnett *et al.* (Barnett *et al.*, 2007) ont constaté cette différence de résistance en compression entre un ciment Portland et un ciment à base de laitiers. Ils attribuent cette différence à l'augmentation de la période dormante observée lorsque le pourcentage de laitiers croît. Ils ont déterminé une différence entre les périodes dormantes d'un ciment Portland et un ciment aux laitiers de 4 heures environ. Dans notre étude, nous avons vu dans le paragraphe précédent que le temps de prise était

légèrement plus important pour le ciment aux laitiers, ce qui confirme que la période dormante est plus importante pour ce type de ciment.

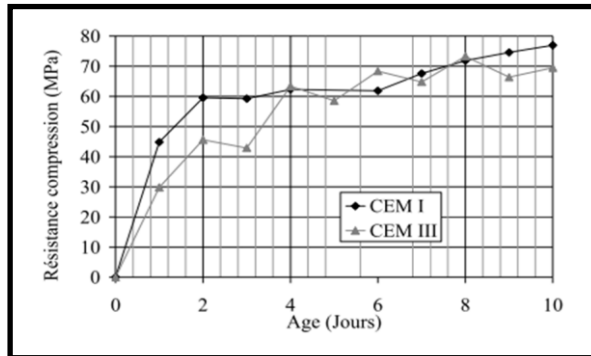


Figure III.6.1 : Evolution de la RC des deux pâtes de ciment avec $E/C = 0,3$ à 20°C

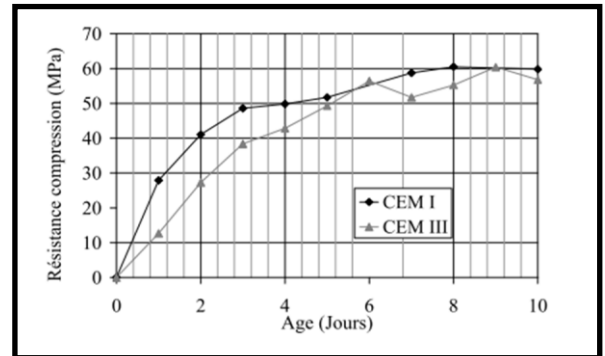


Figure III.6.2 : Evolution de la RC des deux pâtes de ciment avec $E/C = 0,4$ à 20°C

III.6.3 Influence de la température

Dans les premières heures qui suivent la fabrication des pâtes de ciment, **A.PERTUE [16]** ; à observer qu'un accroissement de la température de cure se traduit par une résistance en compression plus élevée. L'augmentation de la température de cure est seulement bénéfique pour la résistance au très jeune âge (Barnett *et al.*, 2006). Ensuite il se produit un effet de croisement des courbes de résistance. Ce croisement est d'autant plus retardé que le rapport E/C est élevé. L'âge du croisement des courbes dépend également du type de ciment. En effet, avec le ciment Portland CEMI avec un $E/C = 0,30$, le croisement des courbes s'effectue à 67 heures environ alors que pour le CEM III le premier croisement des courbes s'effectue à 86 heures. Ces croisements de courbe indiquent que la température n'a pas simplement un effet d'accélération des propriétés mais provoque également une modification des propriétés intrinsèques, de la morphologie et de l'agencement des hydrates formés.

L'hydratation rapide causée par la température élevée engendre de grandes concentrations d'hydrates dans les zones environnant les grains de ciment et la formation de larges pores entre les grains (Barnett *et al.*, 2006). L'augmentation du diamètre des pores pour des températures élevées se traduit par une diminution de la résistance par rapport au matériau curé à température faible ou modérée. Selon, Verbeck, les zones de fortes concentrations d'hydrates forment des barrières ralentissant considérablement la diffusion de l'eau vers les grains de ciment anhydres : il en résulte une diminution du degré d'hydratation final. On peut constater ce phénomène sur les résistances obtenues à 9 jours présentées à la figure III.7: l'augmentation de la

température ne génère pas une augmentation de la résistance à plus long terme, quel que soit la composition étudiée.

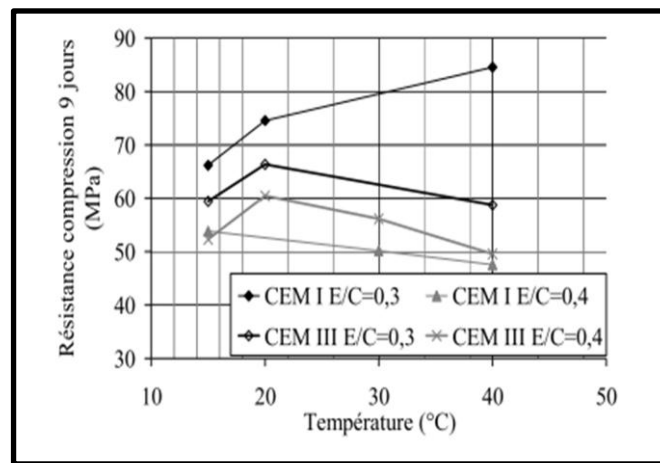


Figure III.7 : Evolution de la Rc à 9 jours en fonction de la température .

III.6.4 Influence du pourcentage des additions substituées au ciment

Les additions et ajouts sont des substances qui améliorent certaines propriétés du béton telles que l'ouvrabilité du béton frais, la résistance et la compacité du béton durci, ou lui confèrent certaines propriétés particulières telles que la teinte. Contrairement aux adjuvants, les quantités d'ajout incorporées au béton sont suffisamment importantes pour être prises en considération dans le calcul volumique.[5]

➤ Influence du type des additions : fillers calcaires (FC) et les cendres volantes (CV)

Des essais mécaniques de résistance à la compression; les échéances d'essais sont à 1, 3, 7, 14, 28 et 90 jours. Les éprouvettes 4x4x16 cm sont testées en compression. Chaque éprouvette donne un résultat de compression. La figure III.8 suivante illustre les résistances obtenues en fonction de la quantité d'addition pour les deux additions minérales, pour toutes les échéances. [21]

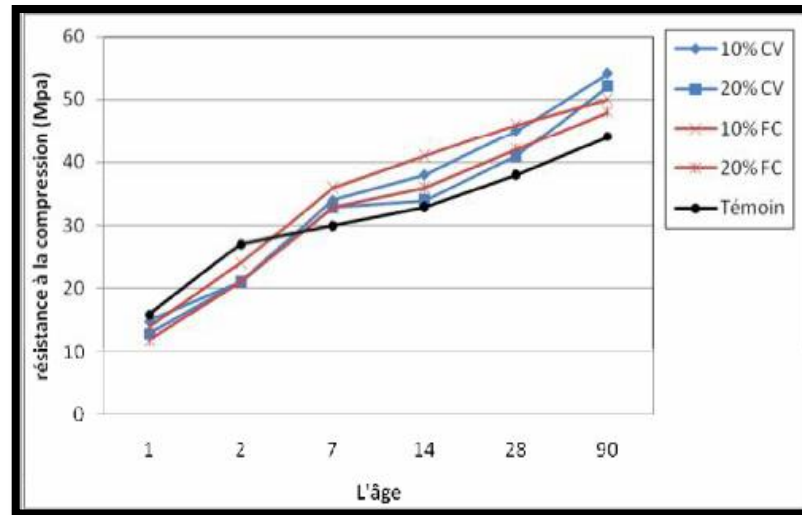


Figure III.8 : Variation de la Rc en fonction de l'âge [21].

C.AMOURI [21], a constaté que les résistances de 1, 2 et 7 jours, sont des fonctions linéaires du taux de substitution pour les deux additions. De plus, que les courbes correspondantes à chaque addition, se positionnent dans un fuseau resserré. Notons une absence d'influence du type et taux d'addition sur les résistances aux courtes échéances pour ce type de ciment.

En effet, Husson (Husson 1991) a montré par une étude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-fillers dans les mortiers que les additions minérales pouvaient avoir un effet retardateur plus important que l'effet accélérateur aux jeunes âges. L'allure des courbes montre un accroissement des résistances continu avec le temps, mais sans changement dans l'ordre de classement relatif aux différents mortiers. La cinétique de durcissement n'est cependant pas la même pour tous les mortiers, les augmentations de résistances durant cette période étant plus grandes pour les mortiers avec cendres volantes à 90 jours pour un taux de 10%. Malgré les différences de valeurs enregistrées selon le taux et le type, il faut préciser que les résistances trouvées sont largement suffisantes déjà à 7 jours. En ce qui concerne les mortiers avec additions, nous constatons, en première approche, que dans tous les cas les additions minérales contribuent à l'amélioration de la résistance en compression à partir de 7 jours. En effet, d'après les études de Bessa (Bessa 2004) la formation d'une ressuée lors du serrage des mortiers sur la table à chocs a été observée indiquant qu'une partie de l'eau piégée dans les vides du squelette granulaire peut se libérer entraînant la réduction de la porosité initiale de ces mortiers et par conséquent une augmentation de la résistance en compression à moyen terme. Les mortiers avec additions présentent les résistances en

compression les plus élevées. De plus, les résistances obtenues sont généralement supérieures à celle du mortier de référence. Cette contribution des additions à la résistance en compression des mortiers traduit leurs interactions avec l'hydratation du ciment.

➤ Influence de la pouzzolane naturelle

D'après A. ALI AICHOUBA, M.GHRICI, A. BENAÏSSA [22] ; La figure III.9 montre que le développement de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant différents pourcentages de la pouzzolane naturelle. On remarque que les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute de résistance. La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge. Cette diminution de la résistance est considérable surtout au jeune âge et augmente lorsque le pourcentage de l'ajout augmente. Le remplacement du ciment par 30% de pouzzolane naturelle diminue la résistance à la compression de 34%, 30% et 25% à 2, 7 et 28 jours respectivement. Cette diminution de la résistance est due au fait que la réaction pouzzolanique n'est pas prédominante aux jeunes âges, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances. Dû au fait qu'à long terme, la réaction pouzzolanique continue son effet en formant des C-S-H supplémentaires qui améliorent l'interface pâte-granulat, donnant par la suite des résistances comparables et parfois élevées par rapport à celles du mortier contrôle à l'âge de 90 jours. Néanmoins, l'amélioration de la résistance au jeune âge peut s'obtenir par un prolongement du broyage (finesse très élevée), une température de cure élevée ou avec l'utilisation des activateurs chimiques.

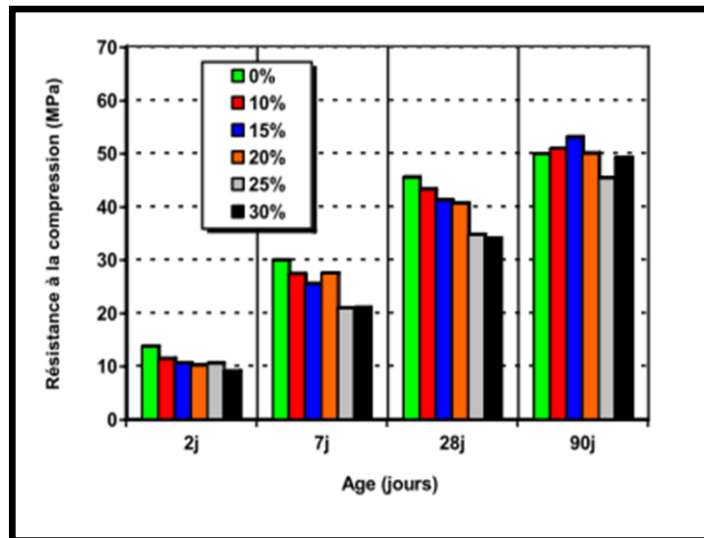


Figure III.9 : Développement de la Rc en fonction de l'âge [22]

Cette étude a été entreprise afin d'évaluer l'effet de l'ajout de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire. Les résultats expérimentaux obtenus montrent que la substitution de 10 à 30% de pouzzolane naturelle dans un ciment Portland au calcaire reflète une consistance normale qui augmente proportionnellement avec le pourcentage d'ajout en raison de sa grande surface spécifique. Par contre, une diminution du temps de prise est observée. Il est également montré que l'ajout de la pouzzolane naturelle diminue les résistances mécaniques des ciments à base de calcaire aux jeunes âges, mais les deux résistances sont comparables à long terme.[21]

➤ Influence de la fumée de silice [23]

D'après A.Kerbouche, M. Mouli, L. Laoufi, Y. Senhadji, S. Benosmane [23] ; L'évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant la fumée de silice à des taux différents en fonction de l'âge est illustrée à la figure III.10. D'après cette figure, on remarque que les résistances des mortiers contenant 5% et 10% de fumée de silice sont presque comparables à celle du mortier contrôle à 2 et 7 jours et représentent 92 % et 96 % respectivement de cette dernière, cela est dû à la réaction pouzzolanique qui se développe très tôt. A 28 jours, on note une augmentation des résistances de ces mortiers qui dépassent celle du mortier contrôle avec des taux de 7 % et 14 % respectivement pour les mortiers contenant 5 % et 10 % de fumée de silice.

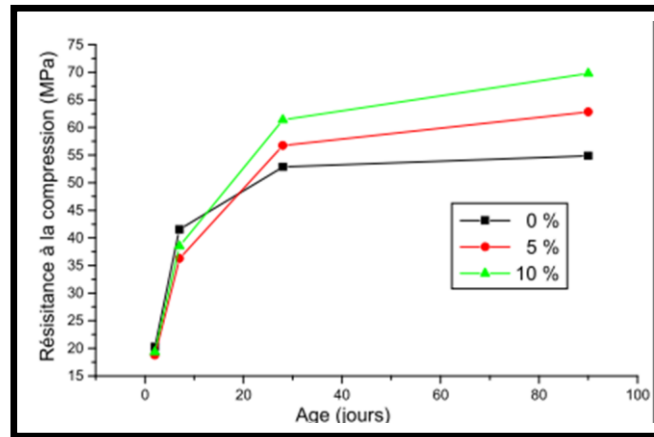


Figure III.10: Evolution de la Rc en fonction de l'âge des mortiers contenant la fumée de silice [23]

L'influence de la fumée de silice sur la résistance à la compression des mortiers à différentes échéances est illustrée à la figure III.10. D'après cette figure, on peut remarquer que la résistance à la compression des mortiers augmente au fur et à mesure que le pourcentage de la fumée de silice augmente quel que soit l'âge des mortiers. En effet la résistance du mortier avec 5% de FS passe d'un taux de 7 % par rapport à celle du mortier contrôle à l'âge de 2 jours à un taux de 19 % à l'âge de 90 jours, par contre la résistance du mortier avec 10% de FS passe d'un taux de 4 % par rapport à celle du mortier contrôle à l'âge de 2 jours à un taux de 27 % à l'âge de 90 jours.

La fumée de silice joue un rôle bénéfique sur la résistance à la compression des mortiers à court et à long terme (2 et 90 jours). Ce gain de résistance est dû à la forte pouzzolanité de la fumée de silice qui prend place très rapidement et vient consommer la portlandite produite par l'hydratation du ciment et à sa très grande surface spécifique d'où l'effet filler entre les grains du ciment, ce qui rend la pâte plus homogène et plus compacte.

III.6.5 Les accélérateurs de prise et de durcissement [5]

Les accélérateurs de prise et de durcissement sont souvent utilisés dans le béton pour compenser, en période froide, l'influence de la température sur les résistances à court terme. Ils constituent également un moyen efficace d'obtenir, à des températures voisines de 20°C, les résistances à très court terme nécessaires pour optimiser le cycle de production sur le chantier.

Nous montrons sur la figure III.11 l'influence d'un accélérateur de prise commercial sur les résistances à court terme (1 et 3 jours) et les temps de prise mesurés sur des mortiers normalisés conservés à 5 et 20 °C. Bien que les résultats donnés par les

fournisseurs d'adjuvants permettent la comparaison objective des différents produits du marché, il reste néanmoins qu'aujourd'hui le seul moyen vraiment fiable d'évaluer l'efficacité d'un accélérateur consiste à effectuer des essais sur le béton étudié dans des conditions d'utilisation identiques à celles du chantier. En effet, l'action effective d'un accélérateur dans le béton dépend de plusieurs facteurs

Qu'on ne sait pas bien prendre en compte dans la formulation des bétons, à savoir :

- ↪ les classes de résistance à vingt-huit jours et au jeune âge du ciment ;
- ↪ la composition minéralogique du clinker ;
- ↪ le type de ciment ;
- ↪ l'interaction avec d'autres adjuvants ;
- ↪ la température.

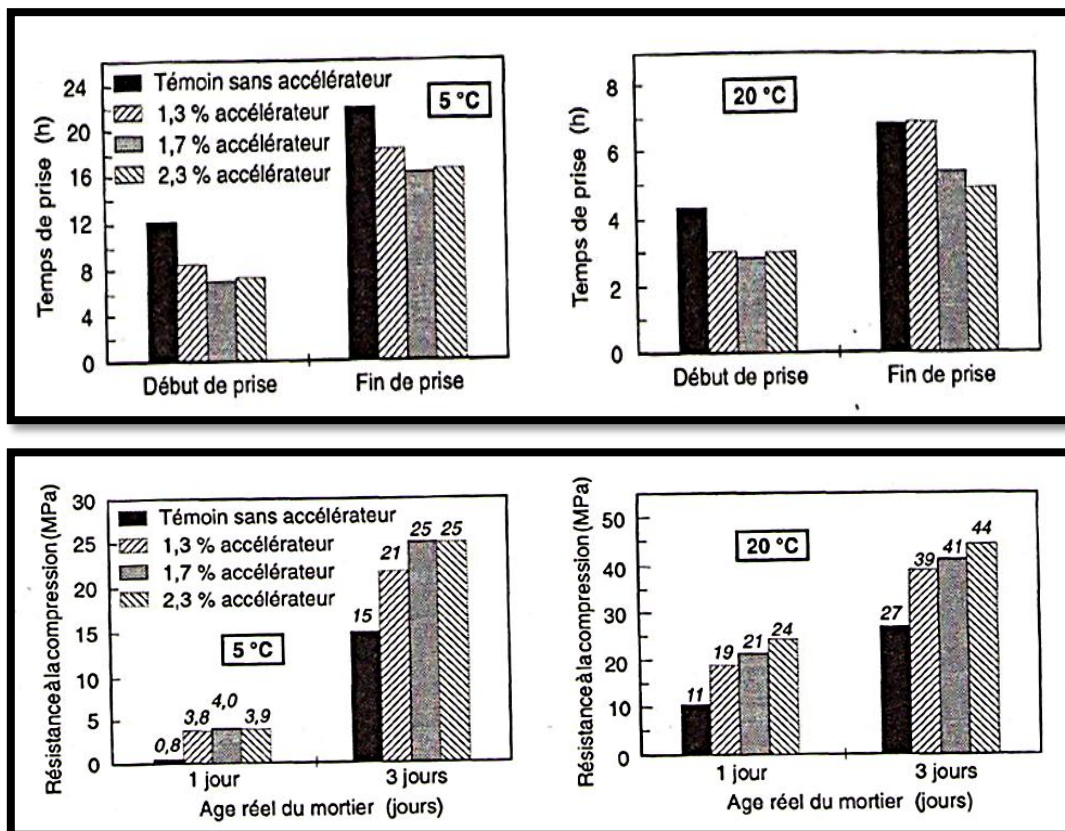


Figure III.11: Influence d'un accélérateur de prise sur le temps de prise et la RC à court terme sur mortier normalisé conservé à 5 et 20°C. [5]

L'analyse rapide de ces résultats tend à montrer que l'accélérateur utilisé serait plus efficace pour le béton de CPJ-CEM II 42,5 R que pour celui de CEM I 52,5 R. Cependant il serait tout fait injustifié de faire cette analyse sur la seule base des résultats présentés sur la figure III.11. En effet, il s'agit là d'un exemple ou, pour être

valable, la comparaison des deux bétons doit absolument se faire pour des maturités équivalentes.

CONCLUSION

L'optimisation des opérations de chantier se traduit de plus en plus souvent par des exigences sur la résistance à la compression à court terme. Pour régler les performances à court terme du béton, le formulateur dispose des moyens classiques tels que le choix des constituants et leurs dosages. Il peut alors satisfaire aux spécifications du cahier des charges dans des conditions normalisées typiques de laboratoire.

Sur site, le développement des résistances dépend essentiellement des conditions environnementales, la température et la géométrie de l'ouvrage étant prépondérantes. A ce niveau, les éprouvettes normalisées sont inadéquates pour caractériser les résistances car elles ne subissent pas l'histoire de températures qui se développe au sein de la structure.

Le concept d'âge équivalent, défini à une température de référence, permet de prendre en compte le couplage temps-température sur la cinétique d'hydratation du ciment en vue de l'estimation de la résistance à court terme. Pour cela, il suffit de caractériser la formulation du béton au laboratoire en termes d'énergie d'activation apparente et de courbe de résistances de référence. Le suivi des histoires de températures en différents points critiques de l'ouvrage peut être converti instantanément en temps équivalent, à l'aide d'un maturomètre. Il permet d'estimer avec une précision satisfaisante la résistance réelle atteinte par le béton.

L'amélioration des méthodes de formulation des bétons en vue d'écourter les délais de fabrication ne doit pas s'accompagner de problèmes de durabilité. Ainsi, le contrôle des retraits et, en particulier, des risques de fissuration doit faire l'objet d'une attention particulière dès que le choix et le dosage des différents constituants ont été faits. Ensuite, des calculs numériques permettent de vérifier l'adéquation de la formulation du béton à la nature de l'ouvrage, en prévision de l'obtention des résistances mécaniques au jeune âge, tout en minimisant les risques de fissuration précoce.

Cette résistance est une parmi les principales préoccupations des formulateurs du béton, et qui nécessite de s'intéresser à certains paramètres influant sur celle-ci.

Pour cette raison, nous avons tracé un programme expérimental visant à améliorer la résistance au jeune âge. de ce fait on est limité au paramètre suivant :

- ◆ l'influence de type de ciment.
- ◆ l'influence d'utilisation des fillers.
- ◆ L'influence d'un adjuvant plastifiant.

Ceci nous permet d'analyser l'effet de ces paramètres sur les résistances des bétons, ainsi d'évaluer leurs influences sur l'augmentation du degré de réaction par un contrôle de température.

ETUDE

EXPERIMENTALE

I. IDENTIFICATION DES MATERIAUX

II. FORMULATION DES BETONS

III. RESULTATS ET INERPRITATIONS

CHAPITRE I

IDENTIFICATION DES MATERIAUX

INTRODUCTION

Pour confectionner un béton selon les normes adéquates, il faut connaître les caractéristiques des différents constituants. La caractérisation des matériaux est indispensable pour toute recherche ou étude d'investigation, parce que chacune de ces caractéristiques a une influence importante sur les résultats d'étude. C'est pour cette raison qu'on procède à la caractérisation de chaque constituant du béton par des analyses et essais normalisés effectués au laboratoire.

Ce chapitre, sera consacré à la détermination des caractéristiques des différents matériaux entrants dans la composition du béton et leur classification selon les normes.

I.1 Présentation général

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiment et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage.

Les granulats étant d'origine diverse, naturelle, alluvionnaire, calcaire éruptive voire artificielle, ou provenant de sous-produits industriels, il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire.

Certaines propriétés des granulats sont directement liées aux caractéristiques des roches originelles. D'autres caractéristiques dérivent du mode d'élaborations des granulats, que ce soit après extraction alluvionnaire, ou par concassage de roches massives en carrières.

I.2 Essai sur les granulats

I.2.1 Echantillonnage et prélèvement (NF P 18-533) [25]

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur les quantités réduites de matériaux. Ces quantités doivent permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble des matériaux dans lequel on a fait un prélèvement. On dit qu'il faut que l'échantillon soit représentatif.

Le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

- Prélèvement au niveau de la carrière d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai proprement dit.
- Au laboratoire: prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui doit être également représentative de l'échantillon de départ.

Chacun de ces deux échantillonnages doit donner un prélèvement aussi représentatif que possible de l'ensemble. Le premier est beaucoup plus embarrassant que le second.

➤ Prélèvement sur le tas (sable et gravier)

Les essais que nous avons réalisés au laboratoire, ont porté sur des échantillons obtenus par des prélèvements sur les tas effectués au niveau :

- De la carrière BOUANDES pour les graviers
- Du gisement de AIN ROUA pour les sables.

Il s'agit de granulats qui sont mis en stock sous forme de tas. Lorsqu'un matériau granulaire 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 prélève donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

➤ Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire)

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur. L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105°C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60 °C dans le cas contraire.

➤ Quartage

Comme le nom l'indique, on divise l'échantillon en quatre parties égales dont on ne retient que la moitié en réunissant deux quarts opposés.

Si cette quantité (1/2) est encore importante, 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 I.1).

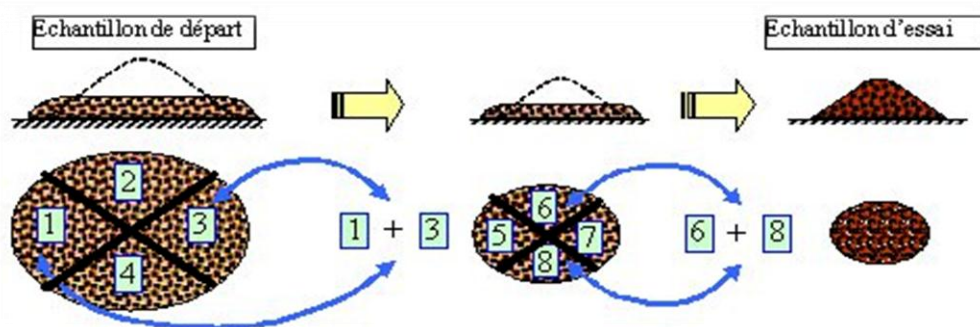


Figure I.1: Opération de quartage

I.2.2 Analyse granulométrique (NF P 18-560) [25]

➤ But de l'essai

Pour de nombreux travaux et pour l'exécution de nombreux essais, il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques de matériaux utilisés, caractéristiques qui représentent:

- Les dimensions.
- La forme.
- La masse volumique.
- La porosité.
- La teneur en impureté, de l'échantillon qui a été prélevé.

L'analyse granulométrique est la première de ces recherches, elle caractérise ces granulats en déterminant la grosseur des grains qui les constituent, et le pourcentage des grains de chaque grosseur.

➤ Principe de l'essai

L'analyse consiste à séparer et classer les grains constituant l'échantillon selon leur grosseurs en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

➤ Matériel utilisé

Ce sont des tamis dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée, sont réalisées soit à partir d'un maillage métallique, soit par perçage d'une tôle. La dimension nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique, depuis le tamis 0,063 mm jusqu'au tamis 80mm.

Les dimensions nominales normalisées des tamis, seuls appareils utilisés actuellement selon la norme (NF P 18-560), sont les suivantes :

Tableau I.1: Dimensions nominales des tamis. [25]

Module	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Tamis (mm)	0.063	0.08	0.100	0.125	0.160	0.200	0.250	0.315	0.400	0.500	0.630
Module	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Tamis (mm)	0.800	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00
Module	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	/
Tamis (mm)	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	/

➤ Conduite de l'essai

Le matériau sera séché à l'étuve à une température maximale de 105 °C, et après avoir pris le poids de l'échantillon, on emboîte les tamis les uns sur les autres, dans un ordre tel que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers pour une analyse complémentaire. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'éviter toute perte de matériau pendant le tamisage (Figure I.2).



Figure I.2 : Colonnes de tamis

On appellera tamisât, le poids du matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé sur le tamis supérieur et on met le couvercle pour éviter la dispersion de la poussière. On agite manuellement ou mécaniquement cette colonne de tamis.

Puisque cette répartition ne sera pas complète, on prend chaque fois un tamis en adoptant un fond et un couvercle et en agitant ce tamis horizontalement en le tenant d'une main et en le frappant par l'autre. On pèse le refus jusqu'au dernier tamis.

On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de vibrations de la tamiseuse.

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

Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent, soit R_2 la masse du deuxième refus.

Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n aux différents niveaux de la colonne de tamis.

↳ **Dimensions des tamis utilisés**

Pour les sables, on utilise les tamis d'ouverture (en mm) :

0,063 - 0,08 - 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5,0.

Pour les graviers, on utilise les tamis d'ouverture (en mm) :

6,3 - 8 - 10 - 12,5 - 16 - 20 - 25 .

☞ Préparation de l'échantillon

La prise de l'échantillon est effectuée par quartage.

La masse du matériau utilisé sera tel que : $M \geq 0.2 D$ selon la norme (NF 18-560)

Tel que : **M** : Masse de l'échantillon en kilogrammes (kg).

D : Diamètre du plus gros granulat, exprime en millimètre (mm).

Les masses des échantillons soumises à l'essai, sont les suivantes :

$$15/25 \Rightarrow M \geq (0.2).25 = 7 \text{ kg}$$

$$8/15 \Rightarrow M \geq (0.2).15 = 6,05 \text{ kg}$$

$$\text{Sable } 0/3 \Rightarrow M \geq (0.2).3 = 1,4 \text{ kg}$$

I.2.3 Analyse granulométrique des gravillons

Les résultats des analyses granulométriques pour les gravillons 15/25 et 8/15 sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau I.2 : Analyses granulométriques du gravier 15/25.

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{\text{éch}} = 7000\text{g}$			
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
25	106	02	98
20	1682	24	76
16	4212	60	40
12.5	6090	87	13
10	6668	95	08
08	6840	98	02

Tableau I.3 : Analyses granulométriques du gravier 8/15.

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : $M_{\text{éch}} = 6050\text{g}$			
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
16	66	01	99
12.5	1322	22	78
10	3196	53	47
08	4416	73	27
6.3	5554	92	08
05	5794	96	04
2,5	5962	98	02

I.2.4 Analyses granulométriques du sable

↳ Préparation de l'échantillon

On prend le poids du sable à son état naturel humide. Séché à l'étuve à une température de 105°C. Soit ($M_{éch}$) sa masse sèche.

↳ Exécution de l'essai

Le mode opératoire de l'analyse granulométrique du sable est le même que pour les gravillons, le résultat de cette analyse est représenté dans le tableau suivant :

Tableau I.4 : Analyses granulométriques du sable 0/3.

Masse de l'échantillon soumis a l'essai : $M_{éch} = 1400g$			
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés R_n (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
6,3	11,2	01	99
05	33,2	02	98
2.5	368	26	74
1.25	739	53	47
0.63	982	70	30
0.315	1128	81	19
0.160	1236	88	12
0.080	1345	96	04
0.063	1390	99	01

I.2.5 Expression des résultats

Les pourcentages des tamisats cumulés, sont représentés sous forme d'une courbe granulométrique sur un graphique semi-logarithmique, en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique et les pourcentages des tamisats en ordonnée, sur une échelle arithmétique. Les courbes sont tracées de manière continue et peut ne pas passer rigoureusement par tous les points.

Les représentations graphiques des analyses granulométriques des tableaux I.2 , I.3 et I.4, sont données par la figure I.3 .

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse **MF**. Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules (23, 26, 29, 32, 35, 38). Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons.

ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES

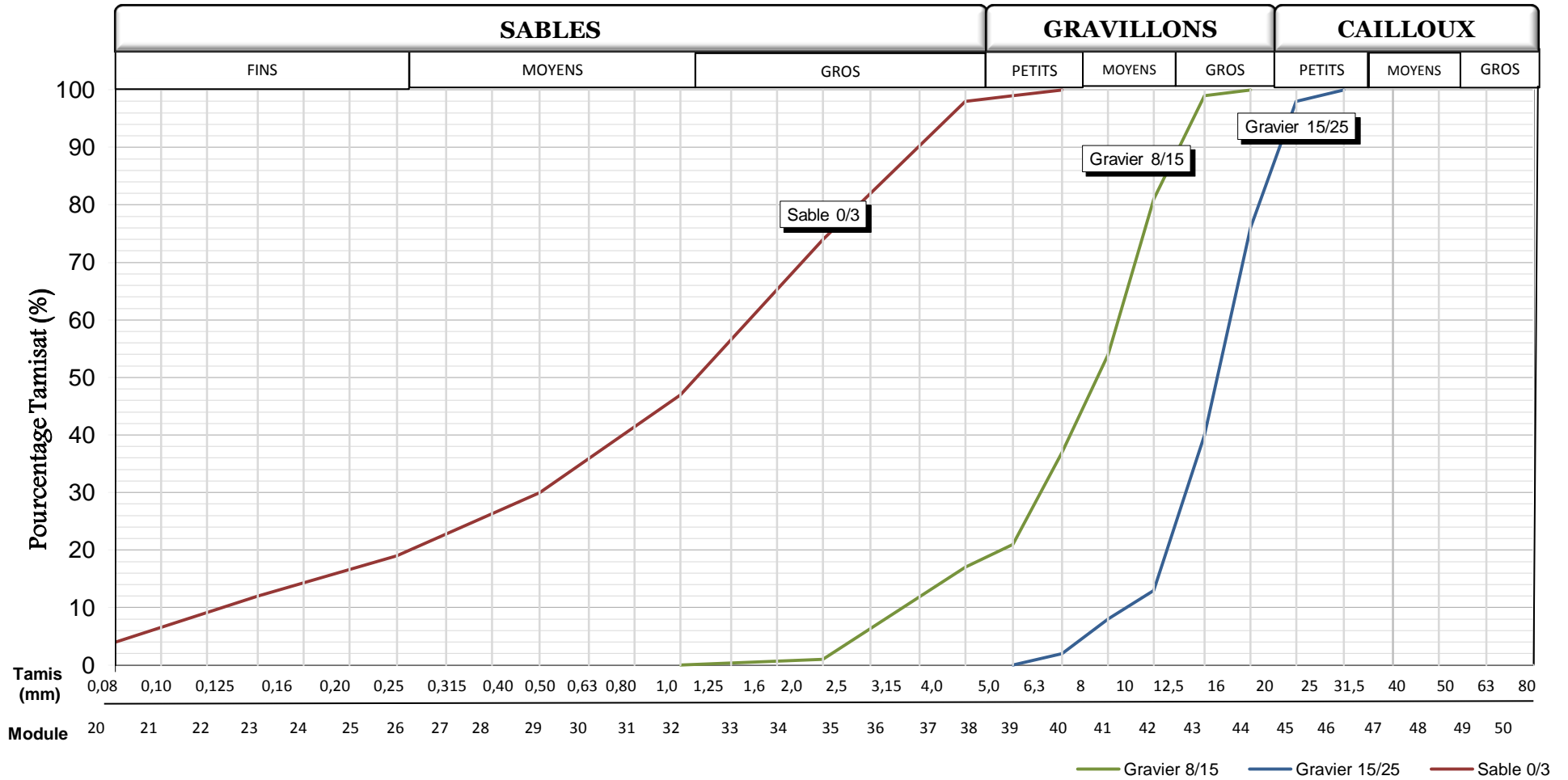


Figure I.3 : Analyses granulometrique de sable et graviers.

Dans le cas de la courbe granulométrique du sable présenté précédemment, son module de finesse est égal à:

$$\left. \begin{aligned} \text{MF} &= \frac{2 + 26 + 53 + 70 + 81 + 88}{100} = 3,2 \\ 1,8 &< \text{MF} < 3,2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{Notre sable un peu grossier.}$$

I.2.6 Détermination de la propreté superficielle [25]

I.2.6.1 Calcul de la teneur en impuretés (NF P 18-591)

➤ Définition

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral des particules inférieures à 0.5 mm, mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2 mm.

➤ Principe de l'essai

L'essai consiste à séparer par lavage sur le tamis 0.5 mm, les particules inférieures à 0.5mm contenues dans l'échantillon pour essai.

➤ Matériels utilisés

- Un tamis de 0.5 mm.
- Un tamis de décharge.
- Une balance.
- Une étuve réglée à 105°C.

➤ Préparation de l'échantillon soumis à l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les perspectives de la norme (NF P 18-533) c'est-à-dire par quartage.

La masse (M) de l'échantillon pour essai doit être comprise entre 200D et 600D. (M) étant exprimée en grammes, et (D) la dimension maximale des plus gros éléments en millimètres.

➤ Exécution de l'essai

- Préparer l'échantillon tel qu'il est (dans son état humide). Soit (M_h) sa masse humide.
- Laver l'échantillon après l'avoir peser sur le tamis de 0.5mm sous un jet d'eau.
- Egoutter et sécher à l'étuve à 105°C.
- Peser l'échantillon sec. Soit (M_s) sa masse.

➤ Expression des résultats

La teneur en impuretés des granulats « P » est obtenue par le rapport :

$$P = [(M_h - M_s) / M_s] \times 100$$

Les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

Tableau I.5 : Teneur en impureté des graviers à 15/25 et 8/15.

Nature du matériau	Masse totale humide M _h (g)	Masse totale sèche M _s (g)	Teneur en impureté P
15/25	6040	5956	1.41
8/15	5100	5030	1.39

On remarque que la teneur en impureté P (15/25 et 8/15) < 1,5 ⇒ Donc nos gravillons sont propres, il ne nécessite pas un lavage.

I.2.6.2 Détermination de propreté de sable [24]

Pour les sables, la propreté peut se contrôler comme pour les graviers, mais la mesure la plus pratiquée et la plus représentative demeure de l'essai dit «Equivalent de Sable » réalisé dans des éprouvettes, à l'aide d'une solution lavante et dont le principe se base sur la vitesse de sédimentation des grains.

➤ Equivalent de sable (NF P 18-598)

↳ Définition

La détermination de l'ES s'effectue sur la fraction de sable passants au tamis à mailles carrés de 5 mm et compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans cette fraction, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argiles, impuretés...).

L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100 de la hauteur sédimentée à la hauteur totale du floculât.

Ces hauteurs sont mesurées dans une éprouvette où la prise d'essai à été traitée, dans des conditions définies, par une solution lavante capable de faire flocculer les éléments fins l'équivalent de sable s'exprime par:

- **ESP** : Equivalent de sable mesuré au piston (le sable est compacté dans l'éprouvette).
- **ESV** : Equivalent de sable mesuré a vue (les hauteurs mesurées directement par la règle).

↳ **But de l'essai**

Cet essai a pour but de mesurer la propreté d'un sable si le pourcentage de fine ne dépasse pas les 10%.

Dans notre cas, le pourcentage en fine du sable AIN ROUA est de 01% alors, on effectuera cet essai.

↳ **Matériels utilisés**

- Prise d'essai correspondant à une masse sèche de $120\text{g} \pm 1\text{g}$ de sable passant au tamis de 5mm.
- Eprouvettes graduées.
- Un tube laveur (tuyau souple, robinet).
- solution lavante.
- Une règle graduée.
- Un piston.
- Un chronomètre.
- Un agitateur électrique.

↳ **Préparation de l'échantillon pour essai**

L'échantillon pour laboratoire doit être préparé suivant les prescriptions de la norme (**NF P 18-553**).

Sa masse doit être telle que la fraction passant au tamis de 5 mm pèse 500 à 700 g.

L'essai s'effectue sur un sable dont la masse sèche doit être égale à $120\text{ g} \pm 1\text{ g}$.

➤ **Exécution de l'essai**

↳ **Mise en place de l'essai**

- La solution lavante ayant été introduite dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait de repère inférieur, la prise d'essai, correspondant à une masse sèche de $120\text{g} \pm 1\text{g}$ de matériau, est versée soigneusement à l'aide d'un entonnoir, dans l'éprouvette posée verticalement.
- Laisser reposer dix minutes.

↳ **Agitation de l'éprouvette**

- À la fin de cette période de dix minutes, boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation.
- Faire subir à l'éprouvette $90\text{ cycles} \pm 1\text{ cycle}$ en $30\text{ s} \pm 1\text{ s}$.
- Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais.

- Lavage
- Enlever le bouchon et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavante.
- En descendant le tube laveur dans l'éprouvette, rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante, puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette.
- Faire remonter les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale en procédant de la manière suivante : l'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait de repère supérieur, relever le tube laveur, de façon à ce que le niveau du liquide se maintient à hauteur du trait de repère.
- Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.

↳ Mesures

- Laisser reposer pendant $20 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$.
- Au bout de ces 20 min, mesurer à l'aide du réglet la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette.
- Mesurer également la hauteur h_2 du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette.
- Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appui sur l'éprouvette.
- Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston. Introduire le réglet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston.
- Lire la hauteur du sédiment h'_2 au niveau de la face supérieure du manchon.
- Arrondir les hauteurs h_1 , h_2 et h'_2 au millimètre le plus voisin (Figure I.4).

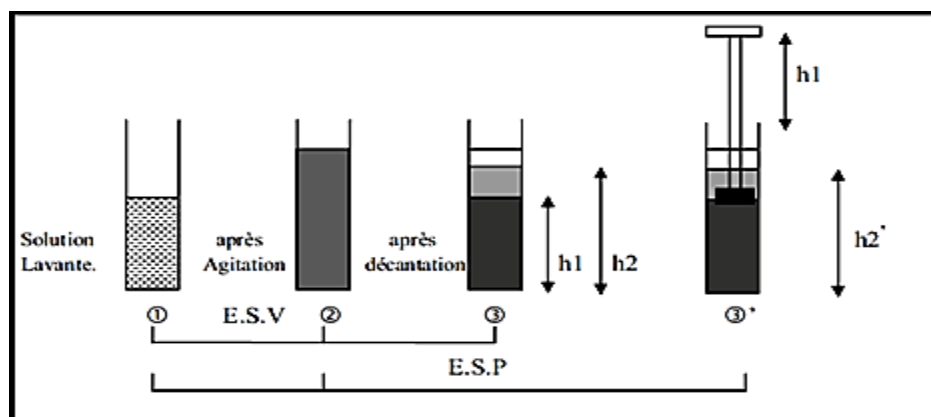


Figure I.4 : Equivalent de sable.

➤ Expression des résultats

L'équivalent de sable par piston est donné par la formule :

$$Esp = \frac{h'_2}{h_1} \times 100$$

L'équivalent de sable visuel est, dans les mêmes conditions, donné par la formule :

$$Esv = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Le tableau suivant récapitule les résultats de l'essai :

Tableau I.6 : Equivalent de sable

N° Essai	Masse de l'échantillon (g)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	h' ₂ (cm)	Esv (%)	Esp (%)	Esv moy (%)	Esp moy (%)
01	120	10,3	7,80	7,80	75,72	75,72	75,14	74,70
02	120	10,2	7,70	7,00	75,56	68,62		
03	120	9,4	7,50	7,50	74,46	79,78		

Dans notre étude on prendra en considération que la valeur de l'équivalent de sable par piston ESP donc :

$$70 < ESP < 80 \Rightarrow \text{sable propre à faible pourcentage de fines argileux.}$$

I.2.6.3 Essai au bleu de méthylène dit essai à la tache (NF P 18-592) [25]

➤ But de l'essai

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène. Le bleu de méthylène étant adsorbé préférentiellement par les argiles, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments. On appelle «valeur au bleu» des fines, la quantité exprimée en grammes de bleu de méthylène adsorbée par une quantité de fines.

➤ Principe de l'essai

On injecte successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène dans le bain aqueux contenant la prise d'essai. On contrôle l'adsorption du bleu après chaque ajout, en effectuant une tache sur un papier filtre.

➤ Equipement nécessaire (Figure I.5)

- Balance dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0,1 %.
- Chronomètre au 1/10 s.
- Tamis de mailles carrées d'ouverture 2 mm

- Un b cher en plastique ou en verre de 1000 cm³, doit avoir les dimensions approximatives suivantes : 140 mm de hauteur et 100 mm de diamètre.
- Un agitateur magnétique, de vitesse de rotation est d'au moins 400tours/minute, muni d'un aimant de 8mm de diamètre et de 60 mm de longueur.
- Une burette de capacité 50 ml et de graduation 1/10 ml.
- Papier filtre sans cendre d'épaisseur 0,20 mm.
- Solution de bleu de méthylène de qualité médicinale à 10 g/l \pm 0,1 g/l.
- Eau distillée.
- Une baguette en verre, qui doit avoir une longueur approximative de 300 mm et de diamètre de 8 mm.



Figure I.5 : Appareil nécessaire de l'essai au bleu

➔ Conduite de l'essai

➔ Préparation de la solution de bleu de méthylène à 10g/L

Préparer la solution de bleu méthylène en mélangeant, à raison de 10g de poudre de bleu de méthylène par litre de solution, des cristaux du bleu de méthylène à de l'eau distillée. Porter à 40 C et agiter pendant 3h à environ 300 tours par minute, à cette fin utiliser l'agitateur magnétique combiné de plaque chauffante.

➔ Préparation de l'échantillon pour essai

L'essai est effectué sur la fraction granulométrique 0/2 mm du matériau, car se sont principalement les éléments les plus fins (inférieurs à 2 mm) qui contiennent la fraction argileuse. Celle-ci donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène.

➔ Mise en place de la prise d'essai

On prépare 30g de la fraction 0/2 mm du sable sec que l'on met à tremper dans le b cher de 100 ml d'eau déminéralisée. Le tout est maintenu en agitation permanente au moyen de l'agitateur pendant 3 min, à 400 tours/min.

↳ Test à la tache

Il consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension du sable jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argile. Et le test de la tache permet de repérer l'instant de saturation (Figures I.6 et I.7).

Pour cela, on prélève une goutte de liquide dans le bêcher contenant le sable imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre.

Deux cas sont possibles :

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide (auréole) incolore :

Le test est négatif.

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide (auréole) teintée de bleu :

Le test est positif.

↳ Dosage

A l'aide de la burette, on injecte dans le récipient une dose de 2 cm³ de solution de bleu de méthylène, cette addition étant suivie du test de la tache sur le papier filtre.

On procède ainsi jusqu'à ce que le test devienne positif. A ce moment, on laisse s'opérer l'adsorption du bleu tout en effectuant des tests de minute en minute.

Chaque addition est suivie de tests effectués toujours de minute en minute.

⇒ Expression des résultats

↳ Valeur au bleu

La valeur au bleu des fines (VB) est donnée par la formule suivante :

$$VB = \frac{V}{M} \quad \text{avec :}$$

V : volume de solution de bleu utilisée jusqu'à obtention du test positif (en cm³).

M : masse sèche de la prise d'essai (en g).

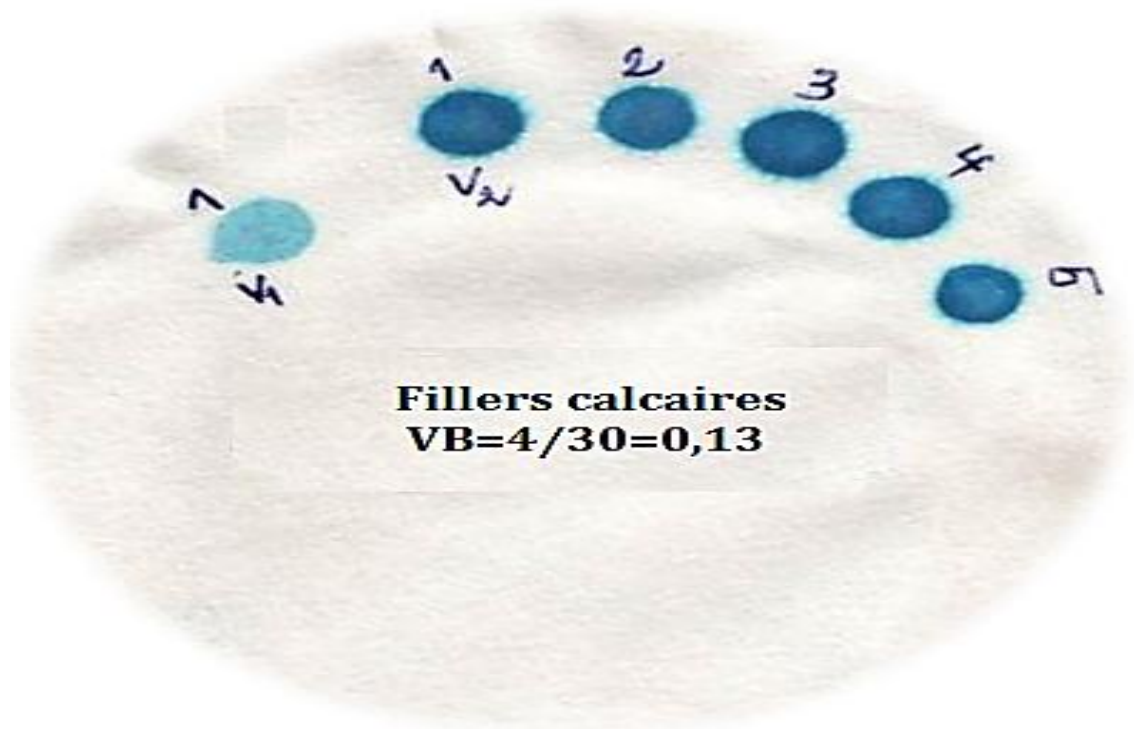


Figure I.6 : résultat de l'essai à la tache de fillers calcaire

↳ **Interprétation des résultats**

Comme $VB_1 = 0,13 < 1 \Rightarrow$ Fillers calcaire non argileuse.

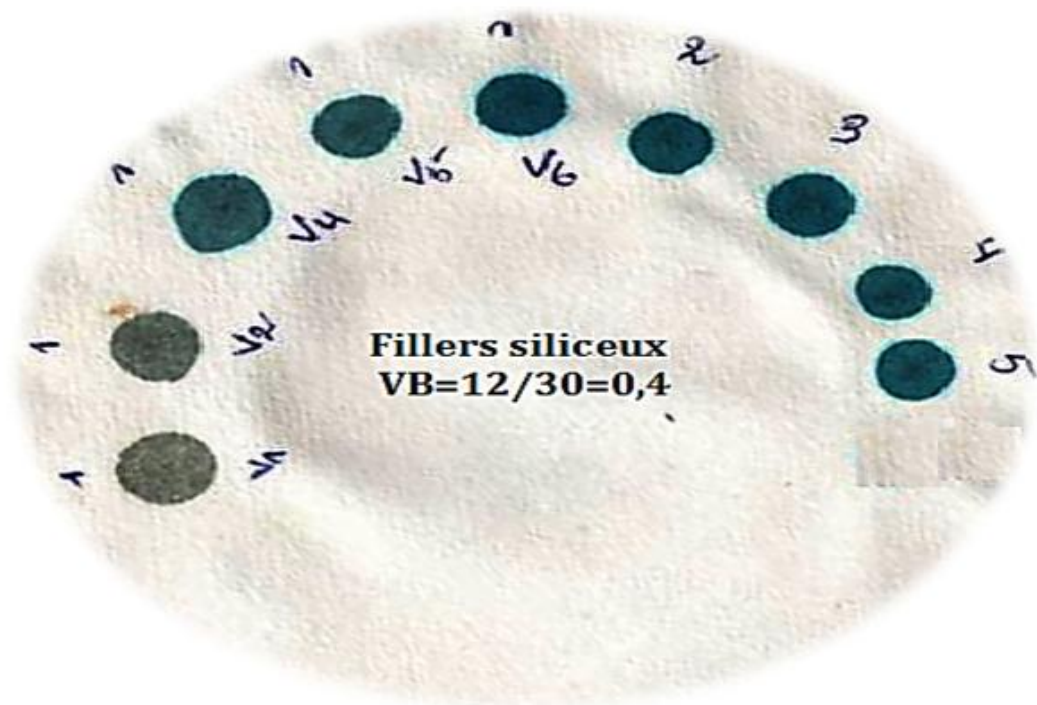


Figure I.7 : résultat de l'essai à la tache de fillers siliceux

↪ Interprétation des résultats

Comme $VB_2 = 0,4 < 1 \Rightarrow$ Fillers siliceux non argileux

I.2.7 Détermination des masses volumiques absolues et apparentes des granulats

I.2.7.1 Masse volumique absolue (NF P 18-555) [24]

➤ Méthode de l'éprouvette graduée

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

↪ Définition

La masse volumique absolue 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.

↪ Matériel Utilisé

- Des éprouvettes graduées.
- Une balance.

↪ Conduite de l'essai

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume (V_1) d'eau.
- Peser un échantillon sec de granulat de masse (M) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette.
- Lire le nouveau volume V_2 (Figure I.8).
- La masse volumique absolue est alors : $\rho_s = M / (V_2 - V_1)$.



Figure I.8 : Mesure de la masse volumique absolue

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

- La masse de l'échantillon : $M = 300$ g pour tous les graviers.
- Le volume d'eau dans l'éprouvette : $V_1 = 600$ cm³.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau I.7 : Masse volumique absolue

matériau	N° d'échantillon	M (g)	V ₁ (cm ³)	V ₂ (cm ³)	$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1}$ (g/cm ³)	$\rho_{\text{s moy}}$ (g/cm ³)
Gravier 15/25	1	300	600	720	2.50	2.55
	2	300	600	715	2.60	
	3	300	600	715	2.60	
Gravier 8/15	1	300	600	715	2.60	2.58
	2	300	600	718	2.54	
	3	300	600	715	2.60	
Sable 0/3	1	300	600	720	2.50	2.60
	2	300	600	710	2.72	
	3	300	600	715	2.60	

I.2.7.2 Détermination de la masse volumique apparente (NF P 18-554) [25]

↪ Définition

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

↪ Matériels Utilisés

- Un récipient.
- Une règle à araser.
- Une balance.

↪ Conduite de l'essai

- On pèse d'abord le récipient vide (M) pour éliminer son poids propre, dans la balance.
- On prend une quantité du matériau, pour faire l'échantillonnage.
- On met le matériau échantillonné dans les mains formant un entonnoir.
- On laisse le matériau couler dans le récipient afin d'avoir un débordement.
- On arase le surplus du matériau à l'aide d'une règle à araser.
- On pèse le récipient rempli. Soit M' la masse de l'ensemble.

L'opération doit être effectuée trois fois pour chaque échantillon.

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

M : la masse du récipient vide.

M' : la masse du récipient plein.

V_r : volume du récipient.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau I.8 : Masse volumique apparente.

Matériau	N° échantillon	Masse pleine(g)	Masse vide(g)	Volume du récipient (cm ³)	$\rho_s = \frac{M' - M}{V}$ (g/cm ³)	ρ_{pmoy} (g/cm ³)
Gravier 15/25	1	1914	488	1020	1.40	1.39
	2	1878	488	1020	1.36	
	3	1940	488	1020	1.42	
Gravier 8/15	1	1952	488	1020	1.43	1.44
	2	1966	488	1020	1.45	
	3	1956	488	1020	1.44	
Sable 0/3	1	2142	488	1020	1.62	1.64
	2	2222	488	1020	1.70	
	3	2205	488	1020	1.62	

I.2.8 Essai de résistance à l'usure et au choc

↳ But des essais

Lors de la fabrication d'un béton, le malaxage est source de frottements intenses entre grains. Si ces derniers ne sont pas assez résistants, ils peuvent se casser en produisant des sables ou des éléments fins. Il est donc nécessaire de procéder à des essais de résistance au choc et à l'usure, afin que les granulats puissent répondre aux spécifications de fabrication des bétons et aussi aux impératifs de pérennité des chaussées.

I.2.8.1 Essai Micro - Deval (NF P 18-572) [24]

↳ Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer dans des conditions normalisées, l'usure des granulats produite par frottements mutuels, en présence d'eau et d'une charge abrasive dans un cylindre en rotation.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les trois classes granulaires :

4 à 6.3mm ; 6.3 à 10mm ; 10 à 14mm de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre.

Si (M) est la masse du matériau soumis à l'essai, (m) la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par la quantité :

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

Par définition, cette quantité sans dimension est appelée, suivant la méthode employée : coefficient Micro-Deval en présence d'Eau tel que : $MDE = \frac{m}{M} \times 100$

↳ Matériel utilisé

L'appareil Micro-Deval comporte 1 à 4 cylindres d'essai en acier ; ils sont entraînés en rotation par l'intermédiaire de deux arbres horizontaux. Chaque cylindre permet d'effectuer 1' essai (Figure I.9).

- La charge abrasive est constituée par des billes sphériques en acier.
- Un moteur doit assurer aux cylindres une vitesse de rotation régulière de 100 ± 5 tours/min.
- Un jeu de tamis de 1,6 - 4 - 6,3 - 10 et 14 mm.



Figure I.9 : Appareil de Micro-Deval

↳ Matériau soumis à l'essai

Pour effectuer un essai en présence de l'eau :

- Tamiser l'échantillon sur les tamis de la classe granulaire choisie.
- La masse de l'échantillon pour essai sera $500g \pm 2g$.

↳ Exécution de l'essai

- Introduire dans le cylindre d'essai, disposé d'une ouverture vers le haut, la charge abrasive, les 500 g du matériau préparé.
- La charge abrasive est fixée conformément aux indications du tableau ci-après :

Tableau I.9 : Charge abrasive correspondant à chaque classe granulaire.

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
4 – 6.3	2000±5
6.3 – 10	4000±5
10 – 14	5000±5

- Après la préparation du matériau on introduit les échantillons dans les cylindres avec 2.5 L d'eau dans Chaque cylindre.
- On ferme les cylindres avec les couvercles, puis on met les cylindres dans l'appareil et on met la machine on marche avec une vitesse de 100 ± 5 tours /min et pendant 2 heures.
- Après essai, on ouvre le cylindre en élevant leur couvercle puis à l'aide d'un bac on récupère le contenu de cylindre.
- Laver soigneusement à la pissette l'intérieur du cylindre en recueillant l'eau et les parties minérales entraînées.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis 1,6 mm.
- Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive, procéder en plusieurs fois pour faciliter l'opération.
- Sécher le refus à 1.6 mm à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.
- Peser ce refus au gramme près, soit m' le résultat de la pesée.

↳ Expression des résultats

Le coefficient micro-Deval est par définition le rapport :
$$\text{MDE} = \frac{500 - m'}{500} \times 100$$

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.10 : Mesure du coefficient « MDE » des granulats 8/15 et 15/25

Matériau	Classe granulaire (mm)	Charge abrasive	Masse(g)			MDE
			Initiale	Supérieur au tamis 1.6mm	Inférieur au tamis 1.6mm	
15/25	10/14	5000	500	408 ,6	91	18
8/15	6.3/10	4000	500	427,3	73	15

I.2.8.2 Essai los Angeles (NF P 18-573) [24]

↳ Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité inférieure à 1.6 mm en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations pendant 15 minutes.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les 6 classes granulaires :

4-6,3 mm, 6,3-10 mm, 10-14 mm, 10-25 mm, 16-31.5 mm, 25-50 mm.

- La classe 10/25 mm doit contenir 60% de 10-16 mm.
- La classe 16/31,5 mm doit contenir 40% de 16-25 mm.
- La classe 25/50 mm doit contenir 60% de 25-40 mm.

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

Tableau I.11 : Charges des boulets correspondants à chaque classe granulaire.

Classe granulaire (mm)	Masse de l'échantillon (g)	Nombre de boulets
4 - 6.3	Tamis $\frac{6.3\text{mm}}{4\text{mm}}$: 5000g	7
6.3 - 10	Tamis $\frac{10\text{mm}}{6.3\text{mm}}$: 5000g	9
10 - 14	Tamis $\frac{14\text{mm}}{10\text{mm}}$: 5000g	11
10 - 25	Tamis $\frac{6.3\text{mm}}{4\text{mm}}$: 3000g Et $\frac{25}{16}$: 2000g	11
16 - 31.5	Tamis $\frac{6.3\text{mm}}{4\text{mm}}$: 2000g Et $\frac{31.5}{25}$: 3000g	12-
25 - 50	Tamis $\frac{6.3\text{mm}}{4\text{mm}}$: 2000g Et $\frac{50}{40}$: 3000g	12

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

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, coefficient Los Angeles.

↪ Matériels utilisés

La machine Los Angeles comporte :

- Un cylindre creux en acier de $12 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités, ayant un diamètre inférieur à $711 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ et une longueur inférieure à 508 mm. Le cylindre est supporté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales, mais ne pénétrant pas à l'intérieur du cylindre.
- Une ouverture de 150 mm de largeur, sur toute la longueur du cylindre permet d'introduire l'échantillon. (Figure I.10).



Figure I.10 : Appareil de Los Angeles

Charge de boulets :

- La charge est constituée par des boulets sphériques de $47 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre et pesant entre 420 et 445 g en acier.
- Un moteur assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière comprise entre 30 et 33 tours/minute.
- Un bac destiné à recueillir les matériaux après essai.
- Un compte tours de type rotatif, arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulu.
- Un jeu de tamis de diamètres convenables.

↳ Préparation de l'échantillon pour l'essai

Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand. Laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

La masse de L'échantillon est de 5000 g ± 2 g.

➔ Exécution de l'essai

- Introduire avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon pour essai.
- Placer le couvercle.
- Effectuer à la machine 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 tr/mn et 33 tr/mn.
- 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.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm, le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.
- Laver le refus au tamis de 1.6 mm.
- Egoutter et sécher à l'étuve à 105°C.
- Peser ce refus une fois séché. Soit (m') le résultat de la pesée.

➔ Expression de résultat

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

Ou $m = 5000 - m'$: masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au

tamis de 1.6 mm, et $LA = \frac{5000 - m'}{5000} \times 100$

Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau suivant :

Tableau I.12 : Mesure du coefficient Los Angeles des granulats 15/25 et 8/15

Nature du matériau	Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse(g)			Coefficient Los Angeles « LA »
			Initial	Supérieur au tamis 1.6mm	Inférieur au tamis 1.6mm	
15/25	10/25	11	5000	3714	1286	26
8/15	6.3/10	09	5000	3812	1188	24

I.2.9 Classification des granulats (XP P 18 - 540) [25]

I.2.9.1 Résultats des essais effectués au laboratoire

Le tableau ci-dessous, résume les résultats de tous les essais effectués au laboratoire.

Tableau I.13 : Récapitulatif de tous les résultats des essais

Echantillons	Granulométrie			ES	P(%)	M F	LA	M DE	Masses volumiques	
	%> D	%< d	%<63μ m						ρ _P	ρ _S
Sable 0/3	18	/	01	74,70	/	3,2	/	/	1,64	2,50
Gravier 8/15	08	27	/	/	1,39	/	24	15	1,44	2,58
Gravier 15/25	02	10	/	/	1,41	/	26	18	1,39	2,55

I.2.9.2 Caractéristiques applicables aux gravillons

➤ Los Angeles (NF P 18-573)

Tableau I.14 : Los Angeles

Catégorie	V _{SS}
LA_A	30
LA_B et LA_C	40
LA_D	50

D'après ce tableau, c'est à dire du point de vue dureté, ces gravillons peuvent être classés en catégorie LA_A.

➤ Granularité (NF P 18-560)

Tableau I.15 : Granularité des graviers

Catégorie	Passants (%)					
	2D	1.58D	D	(d+D)/2	d	0.63d
Gr_A	Vsi 100	Vsi 99	Li 80	Li 25	Li 1	Vss 5
Gr_B			Ls 99	Ls 75		
Gr_C			e 15	e 35	e 15	
			e 19		e 19	

A partir du tableau ci-dessus, on déduira les pourcentages des différentes classes granulaires indiquées dans le tableau suivant :

Tableau I.16 : Résultats sur la granularité des graviers

Catégorie	Passants (%)					
	2D	1.58D	D	(d+D)/2	d	0.63d
8/15	100	100	93	66	08	04
15/25	100	100	98	76	02	05

A partir des deux tableaux précédant, ces gravillons peuvent être classés comme suit :

- 8/15 en catégorie **Gr_A**.
- 15/25 en catégorie **Gr_B**.

⇒ Propreté (NF P 18-591)

On a $V_{ss1.5} = 1.5\%$ (valeur spécifiée supérieure).

- $P(\%)_{8/15} = 1.39 < 1.5 \longrightarrow 8/15$ est propre.
- $P(\%)_{15/25} = 1.41 < 1.5 \longrightarrow 15/25$ est propre.

I.2.9.3 Caractéristiques applicables aux sables

⇒ Granularité (NF P 18-560)

Tableau I.17 : Granularité du sable

Catégorie	Passants (%)		
	2D	1.58D	D
Gr_A à Gr_D	V _{si} 100	V _{si} 99	V_{si} 85 V_{ss} 99

Tableau I.18 : Résultats sur la granularité du sable

Catégorie	Passants (%)		
	2D	1.58D	D
0/3	99	98	89

A partir des deux tableaux précédant, on classera ce sable comme suit :

- Sable 0/3 en catégorie **Gr_A**.

⇒ Module de finesse

Tableau I.19 : Module de finesse

Catégorie	MF	
MF_A	Li 1.8	e 0.6
MF_B	Ls 3.2	e 0.7
MF_C	e 0.7	
MF_D	e 0.8	

Le module de finesse (MF) du sable 0/3 est égal à 3,2, on remarque que cette valeur est comprise entre $L_i = 1.8$ et $L_s = 3.2$ ($L_i=1.8 < MF < L_s=3.2$), alors on classera ce sable comme suit :

- Sable 0/3 en catégorie **MF_B**.

⇒ **Teneur en fines (f)**

Tableau I.20 : Teneur en fines

Catégorie	Passants (%) au tamis de 0.08 mm
f_A	L_S 12 e 3 ou CV ≤ 20%
f_B	L_S 15 e 5 ou CV ≤ 20%
f_C	L_S 18 e 6 ou CV ≤ 20%
f_D	pas de spécifications mais FTP renseigne

D'après le tableau I.4 (Analyses granulométriques du sable 0/3) on constate que la teneur en fines du sable 0/3 est égale à 01%, alors on peut le classer comme suit :

- Sable 0/3 en catégorie **f_A**.

⇒ **Propreté de sable ou valeur de bleu (NF P 18-597 ou NF P 18-592)**

Tableau I.21 : Propreté de sable ou valeur de bleu

Catégorie	PS(%)		Ou VB _{0/D} (g)
	Sable d'extraction alluvionnaire et marine	Autres sables	
PS_A	Vsi 65	Vsi 60	Vss 1
PS_B, PS_C et PS_D	Vsi 60	Vsi 50	

A partir du tableau ci-dessus et le tableau I.6 (Equivalent de sable) on a

ES = 74.70%, donc on peut classer ce sable comme suit :

- ❖ Sable 0/3 en catégorie **PS_A**.

Conclusion

D'après les résultats obtenus lors de la classification des granulats on conclut que :

- **Sable 0/3** : Catégorie **A**.
- **Gravillon 8/15** : Catégorie **A**.
- **Gravillon 15/25** : Catégorie **A**.

I.2.10 Résultats des analyses chimiques

I.2.10.1 Analyse chimique du sable [25]

Tableau I.22 : Analyse chimique du sable 0/3

Désignation de l'échantillon	% Insoluble	% Carbonates CaCO ₃	% Chlorures NaCl	% Gypse CaSO ₄ , 2H ₂ O	Teneur en anions de sulfate SO ₄ ⁻
Sable 0/3 AIN ROUA	2,90	97,01	-	Néant	Néant

Les Analyses chimiques du sable AIN ROUA a été réalisées au niveau du laboratoire LTP-Est (Direction régional Sétif)

A partir de ces résultats, on constate que les sables 0/3 (AIN ROUA) ne sont pas agressifs pour les bétons et sont, riches en CaCO₃ (>97,01 %). Donc ce sont des matériaux calcaires.

I.2.10.2 Analyse chimique du ciment

Le ciment utilisé, est le ciment CPA CEM I-42.5, et le CHF CEMIII -42,5 fabriqué par la cimenterie M'SILA de la société LAFARGE.

Toutes les caractéristiques de ce ciment sont données dans l'annexe A

CONCLUSION

Après la présentation de différentes caractéristiques de nos constituants et les essais qui sont effectué sur l'ensemble des matériaux, nous présenterons dans le chapitre suivant l'étude de formulation des bétons.

CHAPITRE II

FORMULATIONS DES BETONS

INTRODUCTION

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 dont les qualités soient celles recherchées pour la construction d'ouvrages.

Les méthodes proposées sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes, elles aboutissent à des dosages volumétriques ou de préférence pondéraux, le passage de l'un à un autre pouvant toujours se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats.

Le présent chapitre, sera consacré à l'étude de formulation des bétons qui consiste à définir les pourcentages des différents granulats dont on dispose, ainsi que les dosages en eau et en ciment, afin de réaliser un béton dont les caractéristiques soient celles recherchées pour l'ouvrage considéré.

II.1 COMPOSITION DU BETON

L'étude d'une composition de béton consiste presque toujours, à rechercher la consistance, la durabilité et la résistance à la compression ; or la résistance et l'ouvrabilité sont deux qualités liées l'une à l'autre, quant aux facteurs dont elles dépendent varient en sens inverse comme indiqué le tableau suivant :

Tableau II.1 : Qualités de divers paramètres en fonction soit de l'ouvrabilité, soit de la résistance recherchée pour un béton. [26]

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, légèrement préférable
Dimension maximale des granulats	Plutôt petite	Plutôt forte

II.2 QUELQUES METHODES DE COMPOSITION DE BETON

Pour déterminer la composition des bétons à mettre à en œuvre, il existe plusieurs méthodes, telles que :

- Méthode de BOLOMEY.
- Méthode de VALLETTE.
- Méthode de FAURY.
- Méthode de DREUX-GORISSE.
- Méthode de JOISEL.
- Méthode des VOLUMES ABSOLUS.
- Méthode de BARON-LESAGE.

Dans ce qui suit, nous n'allons exposer qu'une seule méthode : la Méthode de FAURY ; celle qu'on a utilisé pour la détermination des dosages de nos bétons.

II.3 METHODE DE FAURY [26]

En 1942, FAURY proposa, comme suit à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation. Il s'inspira pour cette méthode de composition de béton d'une théorie de

Caquot. La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de la racine cinquième de « d » ($\sqrt[5]{d}$) ; c'est pourquoi, Faury adopta une échelle des abscisses graduée en cette racine.

⇒ Définition de Dmax [26]

Le calcul de Dmax, se fait à partir de l'analyse granulométrique du plus gros granulat.

$$D_{\max} = d_1 + (d_1 - d_2) (x/y).$$

Avec :

d_1 : diamètre du plus grand tamis sur lequel il y a eu un refus.

d_2 : diamètre du tamis immédiatement inférieur à d_1 .

x : refus au tamis d_1

y : refus cumulé du tamis d_2 .

Le calcul de Dmax, se fait à partir de l'analyse granulométrique du plus gros granulat.

Donc :

$$D_{\max} = d_1 + (d_1 - d_2) (x/y).$$

$$\left. \begin{array}{l} d_1 = 25 \text{ mm} \rightarrow x = 2 \\ d_2 = 20 \text{ mm} \rightarrow y = 24 \end{array} \right\} \Rightarrow D_{\max} = 25 + (25 - 20) \times \left(\frac{2}{24}\right) = 25,41 \text{ mm.}$$

$$\text{Donc on aura : } D_{\max} = 25,41 \rightarrow D_{\max}/2 = 12,70 \text{ mm.}$$

⇒ Tracé de la courbe granulaire de référence

Ce n'est plus un segment de droite ; mais deux segments formant une ligne brisée. Il faut définir : l'origine, l'extrémité et le point de brisure.

- origine : point de l'axe des abscisses correspondant au tamis de 0,0065 mm. On représente sur l'axe des abscisses les dimensions des tamis, et sur l'axe des ordonnées le % des tamisats cumulés en volume absolu.
- extrémité : point d'abscisse Dmax et d'ordonnée 100 %
- point de brisure : abscisse Dmax/2; ordonnée y (Dmax/2) donnée par la formule

$$\text{S'il s'agit d'un béton en masse défini : } y_{D_{\max}/2} = A + 17\sqrt[5]{D_{\max}}$$

S'il s'agit d'un béton avec effet de ferrailage et de coffrage :

$$y_{D_{\max}/2} = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{R/D_{\max} - 0,75}$$

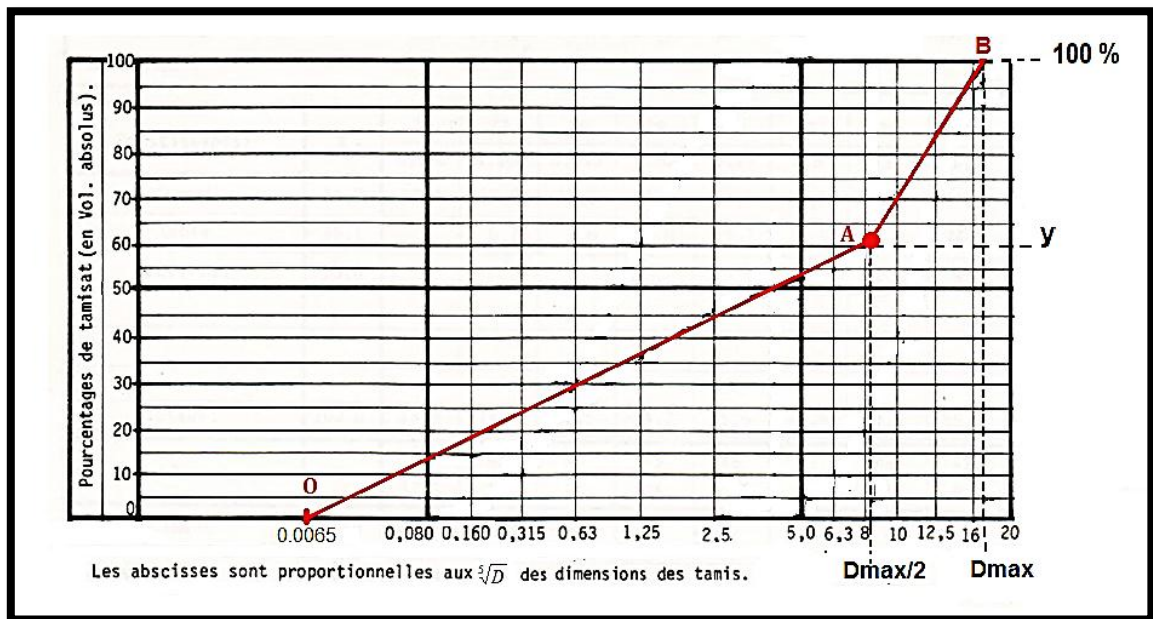


Figure II.1 Courbe de référence [27]

A : consistance traduisant la maniabilité du béton (voir le tableau II.3 qui suit),

B : constante traduisant l'importance du serrage du béton :

$$\left\{ \begin{array}{l} B = 1 \text{ pour vibration puissante.} \\ B = 1,5 \text{ pour vibration moyenne.} \end{array} \right.$$

R : rayon moyen de moule de coffrage (en mm).

Tableau II.3 : Valeurs de A selon la méthode de FAURY. [26]

	Sables et graviers roulés usuels	sables roulés et graviers de broyage usuels	Sables et graviers de broyage usuels
Consistance très fluide, mise en œuvre sans serrage	32 et au-dessus	34 et au-dessus	38 et au-dessus
Consistance fluide pour serrage moyen	30-32	32-34	36-38
Consistance molle pour serrage moyen	28-30	30-32	34-36
Consistance ferme pour serrage soigné	26-28	28-30	30-32
Consistance très ferme pour serrage puissant	24-26	26-28	28-30
Consistance de terre humide, serrage très puissant	22-24	24-26	28-30
Serrage exceptionnellement puissant	Au-dessous de 28 (à déterminer dans chaque cas)	Au-dessous de 28 (à déterminer)	Au-dessous de 28 (à déterminer)

➤ Déterminations des coordonnées du point de brisure A

Dans notre cas, le calcul de « y (Dmax/2) » se limiterait à cette formule :

$$y_{D_{\max}/2} = A + 17\sqrt[5]{D_{\max}}$$

{ En abscisse : Dmax/2=12,70 mm.
 { En ordonnée: y (Dmax/2).

La valeur de A = 35 (Le tableau II.3 :consistance molle et serrage moyen pour un sable et gravier de broyage usuel).

$$\Rightarrow y_{D_{\max}/2} = 35 + 17\sqrt[5]{25,41} = 67,46\% \approx 67\%$$

Donc les coordonnées du point « O A B » qui se compose de deux tronçons de droites OA et AB sont :

$$O \left\{ \begin{array}{l} 0,0065 \text{ mm} \\ 0\% \end{array} \right\}, \quad A \left\{ \begin{array}{l} 12,70 \text{ mm.} \\ 67\% \end{array} \right\} \quad \text{et} \quad B \left\{ \begin{array}{l} 25 \text{ mm.} \\ 100\% \end{array} \right\}$$

La présentation graphique de la courbe granulair de référence « O A B » et les courbes granulométriques des granulats est schématisée dans la figure II.3

Les proportions des différents granulats s'obtiennent en reliant, pour chaque courbe, le point d'ordonnée 95% au point d'ordonnée 5% de la courbe suivante.

L'ordonnée où ces droites coupent la courbe de référence indique les proportions des granulats.

Le point de croisement entre la ligne des ordonnées et la courbe de référence, nous donne le pourcentage de ciment. [26]

➤ Calcul de l'indice des vides et de la quantité d'eau de gâchage [27]

Pour un béton d'une consistance donnée avec des matériaux donnée, il y a un volume maximal de matières solides auquel correspond un vide minimal ; celui-ci est donné

$$\text{par : } E = \frac{k}{\sqrt[5]{D_{\max}}}$$

Tableau II.4 Les valeurs de K. [27]

Consistance du béton	Moyenne de mise en œuvre	Matériaux utilisées		
		Sable roulé Gravier roulé	Sable roulé Gravier Concassée	Sable et Gravier concassée
Molle	Piquage damage	0,34	0,36	0,38
Normale	Vibration moyenne	0,26 à 0,28	0,26 à 0,28	0,30 à 0,34
Ferme	Vibration poussée	0,25 à 0,27	0,26 à 0,30	0,28 à 0,30
Très ferme	Vibration puissante	< 0,24	< 0,25	< 0,27

Pour 1 m³ de béton, on a :

- volume absolu du ciment total = dosage en ciment/ Masse volumique absolu du ciment.
- volume absolu total des constituants solides égal à 1-E, nous avons donc :

$$V_{\text{Ciment}} + V_{\text{Sable}} + V_{\text{Gravier}} = 1 - E$$

Les volumes de sable, ciment et gravier sont déterminés à partir de la courbe granulométrique.

Les proportions des différents granulats s'obtiennent en reliant, pour chaque courbe, le point d'ordonnée 95% au point d'ordonnée 5% de la courbe suivante.

L'ordonnée ou ces droites coupes la courbe de référence indique les proportions des granulats

On peut avoir le pourcentage de ciment à partir de volume de ciment sur le volume

absolu total des constituants $C (\%) = \frac{V_{\text{ciment}}}{1000 - E} [27].$

Ou à partir d'un point de croisement entre la ligne des ordonnées et la courbe de référence qui nous donne le pourcentage de ciment. [26]

K : coefficient tenant compte de la consistance et du mode de serrage.

Dans notre cas : K=0,34 (Consistance normale pour un sable et gravier concassée).

$$K=0,34 \rightarrow E = \frac{0,34}{\sqrt[5]{25,41}} \times 1000 = 178L.$$

Volume absolu des granulats dans un mètre cube (1 m³) du beton:

$$\left. \begin{array}{l} V_{\text{Total}} = 1000 - 178 = 822L \\ V_{\text{ciment}} = \frac{350}{3,1} = 112,90 L \end{array} \right\} \Rightarrow C (\%) = \frac{V_{\text{ciment}}}{1000 - E} = \frac{112,90}{822} \times 100 = 13,73\% \approx 14\%$$

Donc : C (%) = 14%

A partir de graphique ,on aura :

$$\left. \begin{array}{l} G_1 (\text{pourcentage du graviers } 15/25) = 32\% \\ G_2 (\text{pourcentage du graviers } 8/15) = 20\% \\ S (\text{pourcentage du sable } 0/3) = 34\% \\ C (\text{pourcentage du ciment}) = 14\% \end{array} \right\} \Rightarrow G_1 + G_2 + S + C = 100\%$$

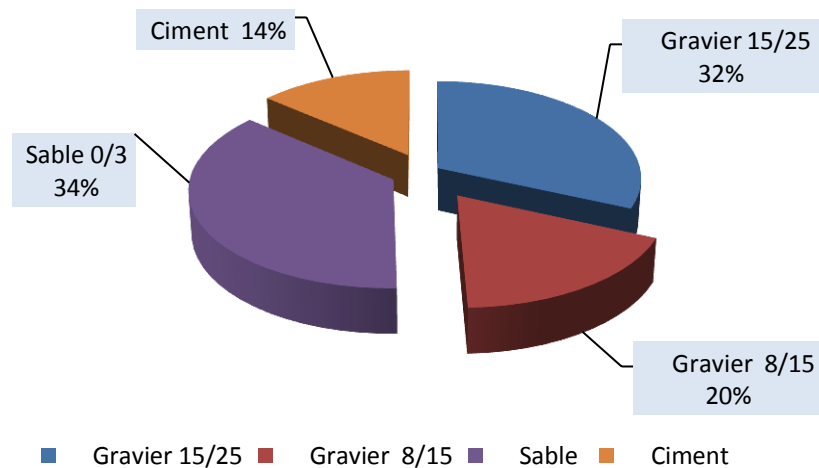


Figure II.2 Les pourcentage des différentes fractions granulaires entrants dans la composition de béton

II.4 TRACE DE LA COURBE DU MELANGE DES GRANULATS

Les valeurs des tamisats en % de la courbe de mélange, sont calculées à partir des analyses granulométriques des granulats et des pourcentages de ces derniers, obtenus précédemment.

Ces valeurs des tamisats sont données par le tableau suivant :

Tableau II.5 : Les valeurs des tamisats (%) de la courbe de mélange

Tamis (mm)	Tamisats (%) S (0/3)	Tamisats (%) G ₁ (8/15)	Tamisats (%) G ₂ (15/25)	Ciment (%) C	Mélange 0.34S + 0.20 G ₁ + 0.32 G ₂ + 14 C
31,5	100	100	100	14	100
25	100	100	98	14	99
20	100	100	76	14	92
16	100	99	40	14	81
12,5	100	81	13	14	68
10	100	54	8	14	61
8	100	37	2	14	56
6,3	99	21	0	14	52
5	98	17	0	14	51
2,5	74	1	0	14	39
1,25	47	0	0	14	30
0,63	30	0	0	14	24
0,315	19	0	0	14	20
0,16	12	0	0	14	18
0,08	4	0	0	14	14
0,063	1	0	0	14	14

Après le tracé de la courbe de mélange (voir la courbe de mélange), on remarque que cette dernière s'approche bien de la courbe de référence (elles sont presque confondues) ; donc la granulométrie du mélange est bonne.

➤ **Volume de chaque constituant**

Soit V_i le volume absolu de chaque constituant.

$V_i = Vx (y \%)$. Avec :

V : volume.

Y % : pourcentage de chaque constituant.

COURBE DE MELANGE

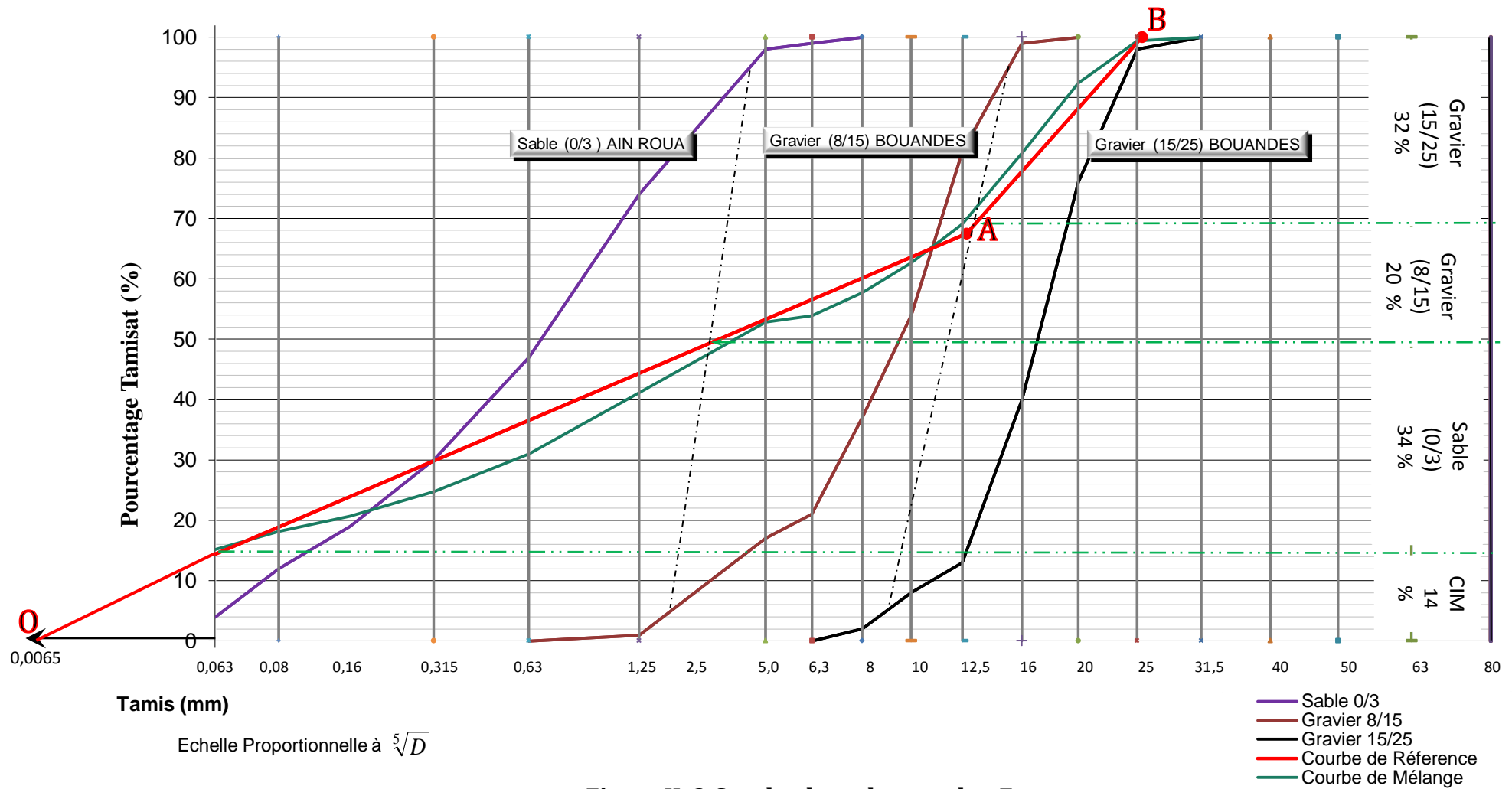


Figure II. 3 Courbe de melange selon Faury

$$\left\{ \begin{array}{l} E = 178 \text{ Litres} \\ V = 1000 - 178 = 822 \text{ litres.} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_{G_1} = 822 \times 0,32 = 263,04 \text{ litres.} \\ V_{G_2} = 822 \times 0,20 = 164,4 \text{ litres.} \\ V_S = 822 \times 0,34 = 279,48 \text{ litres.} \\ V_C = 822 \times 0,14 = 115,08 \text{ litres.} \end{array} \right.$$

⇒ Masse absolue de chaque constituant

La masse absolue de chaque constituant est obtenue en multipliant le volume absolu V_i par sa masse volumique absolue ρ_s .

Avec $M_i = V_i \cdot \rho_s$ on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{G_1} = 263,04 \times 2,55 = 670,75 \text{ Kg/m}^3. \\ M_{G_2} = 164,4 \times 2,58 = 424,15 \text{ Kg/m}^3. \\ M_S = 279,48 \times 2,64 = 737,82 \text{ Kg/m}^3. \\ M_C = 115,08 \times 3,1 = 355,74 \text{ Kg/m}^3. \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{la masse du gravier 15/25} = 671 \text{ Kg/m}^3. \\ \text{la masse du gravier 8/15} = 424 \text{ Kg/m}^3. \\ \text{la masse du sable 0/3} = 738 \text{ Kg/m}^3. \\ \text{la masse du ciment} = 356 \text{ Kg/m}^3. \end{array} \right.$$

Avec un rapport $E/C = 178/356 = 0,5$

Tous les résultats calculés sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.6 : masse des composants pour 1 m³ de béton

Composants	% des composants	Volume absolu des composants (litres)	masse volumique absolue des composants (g/cm ³)	Masse des composants (kg/m ³)
Gravier 15/25	32	263.04	2.55	671
Gravier 8/15	20	164.4	2.58	424
Sable 0/3	34	279.48	2.60	738
Ciment	14	115,08	3.1	356
Eau	-	178	1	178
Total	100	1000	-	2367

La masse totale des composantes dans un 1 m³ de béton :

$$M_{\text{totale}} = 2367 \text{ Kg/m}^3.$$

Soit Δ_0 la densité théorique d'un mètre cube de béton frais telle que :

$$\Delta_0 = (M_{\text{totale}}/1000) = 2.36 \text{ t/m}^3.$$

CONCLUSION

Le béton est un mélange dont la composition a une profonde influence sur ses caractéristiques; mais si les caractéristiques attendues sont la plupart du temps bien définies, la mise au point d'un béton approprié peut s'avérer plus délicate. Les paramètres sont en effet nombreux :

- les données du chantier : matériel de mise en œuvre, conditions climatiques, etc.
- les données liées aux propriétés du béton : maniabilité, compacité, durabilité, etc.

Après avoir présenté dans ce chapitre, la méthode de formulation que nous avons utilisée durant cette étude, nous allons présenter dans le prochain chapitre les résultats obtenus durant nos différentes expérimentations ainsi que les discussions associées.

CHAPITRE III

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

INTRODUCTION

Le béton est un matériau de construction formé par le mélange de ciment, de granulats et d'eau, éventuellement complété par des adjuvants et des additions. Il peut adopter des formes très diverses parce qu'il est modulable. L'objectif est d'obtenir, en place, le béton le plus compact et le plus homogène possible avec les constituants et les moyens de mise en œuvre qui sont disponibles.

On essaye d'étudier au cours de ce chapitre, l'effet des différents paramètres sur les propriétés des béton à l'état frais et durci. Puis une vérification expérimentale de la relation de Bolomey.

III.1 ESSAIS D'ETUDE

Les essais d'études sont les essais qui permettent de vérifier, en laboratoire, les qualités des bétons, notamment leur maniabilité et leur résistance.

➤ Le choix des matériaux

Afin que cette étude couvre nos objectifs, nous avons choisi d'utiliser deux types de ciments, il s'agit du ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 (noté CEM II), et ciment aux laitiers de haut fourneaux CHF-CEM III/B 42,5 (notés CEM III) de la cimenterie de M'SILA société LAFARGE. La recherche et les résultats des essais de **S.KHERBACHE [25]**, ont montré que la composition optimale de 10% de fines, présente les meilleures résistances. Donc, on a choisi d'étudier l'effet de la substitution de 10% de ciment par des fillers calcaires et des fillers siliceux. Pour permettre de juger l'influence de la nature des adjuvants nous avons utilisé un adjuvant plastifiant avec un dosage minimum. Ceci nous permet d'analyser l'effet de différents paramètres sur les résistances des bétons, ainsi d'évaluer leurs influences sur l'augmentation du degré de réaction par un contrôle de température et leur résistance aux différentes échéances (3, 7 et 28 jours).

L'étude a été réalisée sur cinq séries de bétons différents, dans chaque série on fait varier un des paramètres, pour faciliter la désignation de ces paramètres, nous avons affecté à chacune un symbole composé de deux lettres relatives à leurs caractéristiques. Nous les avons nommés BT, BL, BC, BS et BA avec :

- ↪ **BT** confectionné avec un ciment portland composé CPJ- CEM II 42.5 (béton témoin).
- ↪ **BL** confectionné avec un ciment aux laitiers à haut fourneaux CHF- CEM III 42.5
- ↪ **BC** dont 10 % du ciment CPJ est substitué par les fillers calcaires.
- ↪ **BS** dont 10 % du ciment CPJ est substitué par les fillers siliceux.
- ↪ **BA** élaboré avec un ciment CPJ et un dosage en adjuvant (plastifiant).

III.2 CONFECTION DES EPROUVETTES

➤ Dimension des moules (NF P18-400) [25]

Les moules les plus fréquemment utilisés sont les moules cylindriques. Leurs dimensions doivent être choisis en fonction du diamètre maximal des granulats (D) entrant dans la composition du béton. Pour notre étude, on utilisera des moules de $16 \times 32 \text{ cm}^2$.

↳ Gâchée d'essai

La gâchée exécutée au laboratoire, doit permettre d'obtenir un volume de béton frais excédant celui des éprouvettes.

Les constituants sont introduits dans la cuve dans l'ordre suivant :

Gravillons, sable, ciment + ajout et enfin eau+ adjuvant.

L'eau de gâchage doit être rajoutée après un malaxage à sec de l'ordre de 1 min ; le malaxage est alors poursuivi pendant 2 min.

Remarque

Dans notre étude, on compte réaliser des bétons plastiques avec un affaissement voisin de 8 cm. Sachant qu'on a besoin pour chaque gâchée d'essai de :

- Remplir 9 cylindres de 16×32 cm
- Remplir le cône d'Abrams (ce cône pend presque le même volume qu'un cylindre de 16×32)
- Remplir le récipient de l'Aéromètre

Donc on a besoin de remplir un volume a voisinant 11 cylindres

Pour remplir un cylindre (16 ×32 cm) de béton on aura besoin d'un poids **P** (Kg), qu'on calculera comme suit :

$$M = V \times \Delta_0, \text{ tel que :}$$

V : volume du cylindre et $\Delta_0 = 2,36 \text{ t/m}^3$: densité théorique du béton frais. Alors :

$$P = \pi r^2 h \times \Delta_0 = (3.14 \times 8^2 \times 32 \times 2,36) \times \frac{1}{1000} = 15,22 \text{ Kg.} \simeq 16 \text{ Kg.}$$

↳ Masse total de la gâchée

$$M_t = M \times 11 = 16 \times 11 \Rightarrow M_t = 176 \text{ Kg.}$$

Cette masse totale, est celle du béton frais qu'on doit obtenir à la fin de la gâchée. Il reste à déterminer la masse nécessaire pour chaque composant de ce béton (gravier, sable, ciment et eau). Il est obtenu, en divisant cette masse (M_t) totale par un coefficient ξ , tel que :

$$\xi = \frac{\text{Masse totale des composants par un mètre cube de béton}}{\text{Masse totale du béton frais}} \Rightarrow \xi = 2367/176 = 13,4.$$

Donc, pour une gâchée, la masse nécessaire de chaque composant est de :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Eau} \dots\dots\dots (178/13,4) = 13,28 \text{ Kg/m}^3. \\ \text{Ciment} \dots\dots\dots (356/13,4) = 26,56 \text{ Kg/m}^3. \\ \text{Sable 0/3} \dots\dots\dots (737/13,4) = 55,00 \text{ Kg/m}^3. \\ \text{Gravier 8/15} \dots\dots\dots (424/13,4) = 31,64 \text{ Kg/m}^3. \\ \text{Gravier 15/25} \dots\dots\dots (671/13,4) = 50,07 \text{ Kg/m}^3. \end{array} \right.$$

↪ Dosage en adjuvant

L'adjuvant utilisé est le **MEDAFUID 40**, il est dosé selon les prescriptions données par la fiche technique en annexe B. La plage recommandée est fonction de la masse de ciment.

Dans notre cas, on a utilisé un dosage de 0.8 %.

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\text{ciment}} = 26,56 \text{ Kg} \rightarrow 100 \% \\ M_{\text{adjuvant}} = ? \rightarrow 0.8 \% \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} M_{\text{adjuvant}} = (26,56 \times 0.8) / 100 = 0,212 \text{ Kg}. \\ M_{\text{adjuvant}} = 212 \text{ g}. \end{array} \right.$$

↪ Dosages en fonction de l'ajout des fillers

Connaissant le dosage en ciment (26,12 Kg) pour un béton témoin (avec 10% des fillers) nécessaire pour une gâchée, on peut déterminer la masse de ciment et la masse des fillers. Donc :

- 10% de fillers

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Masse du ciment : } M_c = 26,56 - (10/100 \times 26,56) = 23,90 \text{ Kg}. \\ \text{Masse des fillers : } M_f = (10/100 \times 26,56) = 2,65 \text{ Kg}. \end{array} \right.$$

Récapitulation de la composition des différentes gâchées

Tableau III.1 : Récapitulatif de la composition des gâchées

N° Série	Dosage (Kg)						
	Graviers 15/25	Graviers 8/15	Sable 0/3	Ciment	Eau	Fillers	adjuvant
BT	50,07	31,64	55	26,56	13,28	-	-
BL	50,07	31,64	55	26,56	13,28	-	-
BC	50,07	31,64	55	23,90	13,28	2,65	-
BS	50,07	31,64	55	23,90	13,28	2,65	-
BA	50,07	31,64	55	26,56	13,28	-	0,212

III.3 ESSAIS SUR BETON FRAIS

➤ **Essai d'affaissement au cône d'Abrams (NF P 18-451) [24]**

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre, il peut être effectué directement sur chantier. Il est utilisable à tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm.

↪ **Principe de l'essai**

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre. Plus cet affaissement sera grand, plus le béton sera fluide.

↪ **Matériel utilisé**

L'appareillage se compose de 4 éléments :

- un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut, 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure ;
- une plaque d'appui.
- une tige de piquage.
- un portique de mesure.

↪ **Conduite de l'essai**

La plaque d'appui et le moule (fixé sur la plaque) sont légèrement humidifiés. Le béton est introduit dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 25 fois par couche.

Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieure du moule, le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution. Le béton n'étant plus maintenu s'affaisse plus ou moins suivant sa consistance.

Celle-ci est caractérisée par cet affaissement, noté (A), mesuré grâce au portique et arrondi au centimètre le plus proche. La mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage (Figure III.1).

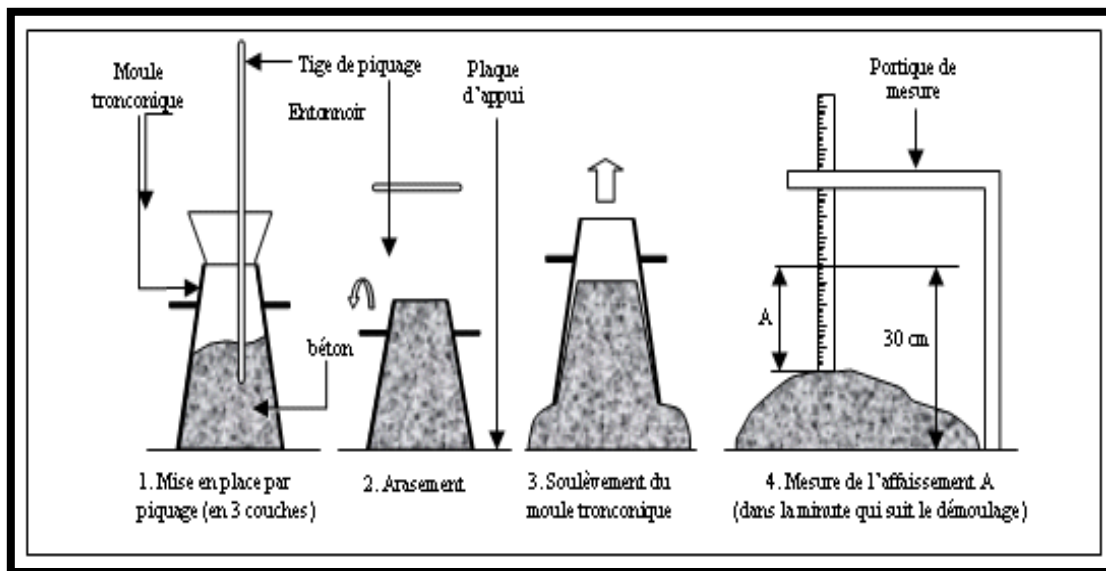


Figure III.1 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

↳ Expression des résultats

Les résultats obtenus sont récapitulés dans l'annexe C, et ils sont schématisés par la courbe suivante :

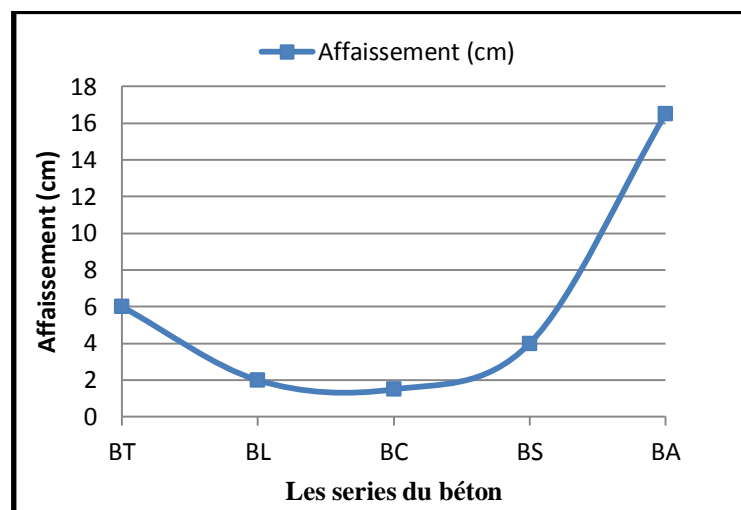


Figure III.2 Variation de l'affaissement en fonction de différentes séries du béton

↳ Interprétation des résultats

Cet essai est exécuté sur le béton frais pour déterminer et quantifier l'ouvrabilité du béton. Les valeurs de l'affaissement obtenus montre que :

Pour un rapport E/C=0,5, on a obtenu une consistance plastique avec le béton témoin et une consistance ferme avec le béton à base de ciment aux laitier. Cela revient à la nature de la composition chimique des deux ciments et leur finesse.

Selon A.PERTUE [16], le ciment à base de laitier, présente une finesse plus élevée par rapport au ciment portland. Généralement, plus la finesse augmente plus la demande en eau augment.

Le remplacement d'une partie de ciment par des fillers, fait passer le béton d'une consistance plastique à une consistance ferme. Cela s'explique par l'effet de fine qui a la capacité d'adsorber de l'eau.

L'introduction d'un adjuvant plastifiant permet d'avoir une consistance fluide comme le montre la figure III.2. Grâce à ces propriétés qui améliore la fluidité, et augmenter la maniabilité.

➤ **Essai de la teneur en air du béton (l'Aéromètre) (NF P 18-443) [24]**

↳ **Principe de l'essai**

Cette méthode consiste à introduire de l'eau sur une hauteur prédéfinie au-dessus d'un échantillon de béton compacté de volume connu se trouvant dans une enceinte étanche et à appliquer sur l'eau une pression d'air prédéterminée. On mesure la diminution du volume d'air contenu dans l'échantillon de béton en observant la valeur de la baisse du niveau d'eau.

↳ **Conduite de l'essai**

- Placer le béton dans le récipient d'une manière à éliminer autant d'air occlus que possible.
- Introduire le béton en deux couches d'épaisseur approximativement égale qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 25 fois par couche. Afin d'éliminer les bulles d'air occlus mais pas l'air entraîné.
- Nettoyer soigneusement les rebords du récipient et l'ensemble du couvercle.
- Plaquer le couvercle et fixer l'ensemble, s'assurer de la bonne étanchéité sous pression entre le couvercle et le récipient.
- Remplir l'appareillage d'eau et éliminer l'air adhérent aux surfaces intérieures du couvercle. Amener le niveau d'eau à zéro dans le tube vertical en purgeant par le petit robinet.
- A l'aide de la pompe à air, appliquer la pression $P = 1$ bar.
- Mesurer la diminution du volume d'air contenu dans l'échantillon de béton en observant la valeur de la baisse du niveau d'eau.

↳ Expression des résultats

Les résultats obtenus sont récapitulés dans l'annexe C et ils sont schématisés par la courbe suivante :

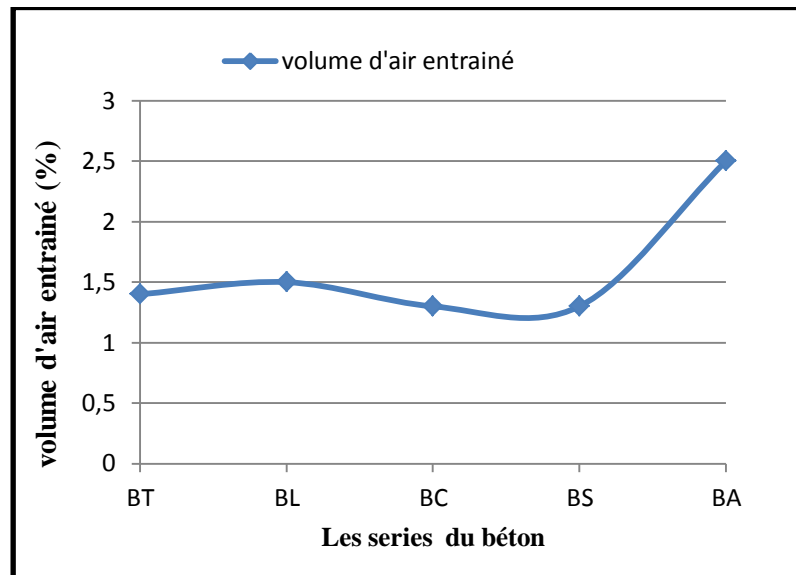


Figure III.3 Evolution du volume d'air entrainé en fonction de différentes série du béton

↳ Interprétation des résultats

Lors de malaxage des bétons, il y a une création de bulles d'air, et la mise en place du béton forme toujours une certaine quantité d'air occlus.

Si on compare les deux premières séries du béton, on remarque une variation légère de volume d'air, ce qui veut dire que la différence de nature de ciment présente aussi une différence de volume d'air occlus. Le besoin en eau de ciment CHF-CIII augmente la porosité dans le béton.

En remarque que le volume d'air diminue en présence de fillers, telle que ces derniers remplissent les pores existants entre les sables et les graviers, et augmenté la compacité de ces bétons.

On voit que le volume d'air dans le béton avec un adjuvant plus élevé par rapport aux autres bétons. Cette élévation revient aux ségrégations qui ont été provoqué par le plastifiant.

↳ Mise en place des bétons

Après avoir effectué l'essai d'affaissement et l'aéromètre, il convient de mettre en place le béton frais dans les moules en trois couches et en vibrant chaque couche à l'aide d'un vibreur pour éliminer les bulles d'air entraînées lors du malaxage. Le béton se trouvant au-dessus du bord supérieur du moule doit être enlevé en arasant les

épreuves. Ces derniers doivent rester dans le moule 24h et sans subir des chocs. Après démoulage, les épreuves doivent être entreposées dans l'eau jusqu'au moment de l'essai.

➤ Mesure des masses volumiques fraîches

Cet essai consiste à :

- Peser le récipient (cylindre de volume V) à vide, soit M sa masse en Kg.
- Peser le récipient rempli, soit M_t sa masse en Kg.

La masse volumique des bétons frais sont alors : $\rho_{BF} = \frac{M_t - M}{V}$ (Kg/m³).

III.4 ESSAIS SUR BETON DURCI [26]

↳ Conservation des bétons

- Les épreuves doivent rester dans le moule et être protégées contre les chocs.
- Après démoulage, les épreuves doivent être entreposées dans de l'eau jusqu'au moment de l'essai (Figure III.4).



Figure III.4 : Conservation des épreuves

- Les six premières épreuves de chaque série réalisée sont soumises à l'essai de compression au jeune âge troisième (03) et septième (07) jour après conservation dans l'eau.
- Les trois autres épreuves seront écrasées au vingt-huitième (28) jour.

➤ Mesure des masses volumiques

On détermine les masses des bétons à l'âge de 1, 3, 7, 14, 21 et 28 jours.

La détermination de la masse volumique est simple :

- On pèse l'éprouvette après nettoyage, soit M sa masse en (kg).
- Puis détermine le volume du récipient, soit V son volume en (m^3).

La masse volumique sera alors calculée par l'équation suivante : $\rho_{BD} = \frac{M}{V}$ (Kg/m^3).

↳ Expression des résultats

Les résultats obtenus sont récapitulés dans l'annexe C, et ils sont schématisés par les courbes suivantes :

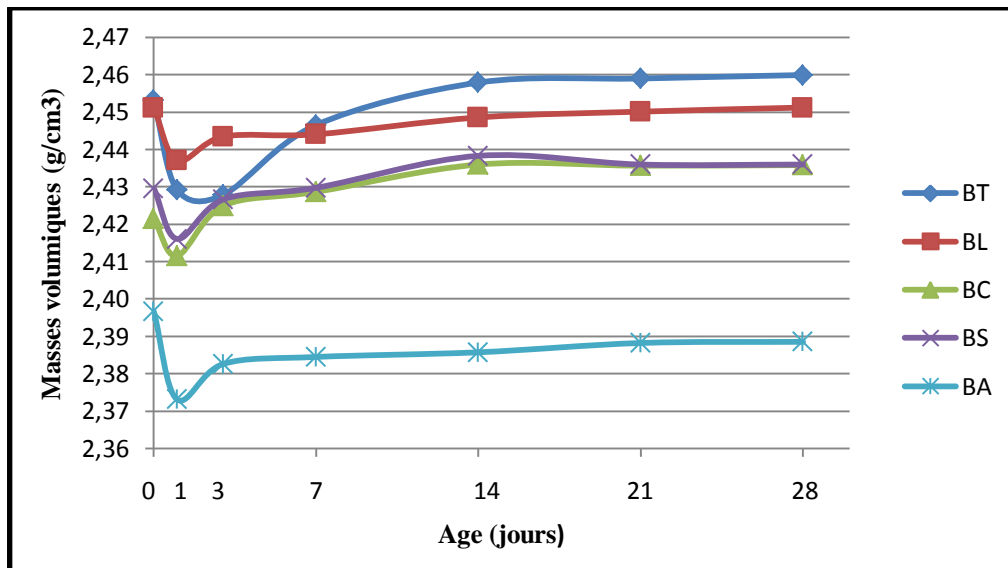


Figure III.5 Evolution des masses volumiques en fonction du temps

↳ Interprétation des résultats

A partir des courbes tracées, nous avons remarqué que :

Entre le jour de confection (0 jour) et 1 jour, on remarque une forte diminution de la masse volumique de tous les bétons et cela revient à l'exposition des éprouvettes à l'air ambiant, ce qui dit le séchage du béton et l'évaporation de l'eau.

A partir de 1 jours jusqu'aux 3 jours, on observe une augmentation des masses volumiques des bétons, qui s'explique par l'hydratation continue des grains de ciment, sachant que les éprouvettes de bétons ont été conservées dans l'eau (absorption de l'eau).

Nous remarquons qu'à partir de 7 jours la masse reste constante pour tous les bétons (se stabilise), donc pas d'absorption d'eau (saturation).

A par une exception pour le béton témoin, on observe une forte augmentation de la masse volumique à partir de 3 jours jusqu'à 14 jours, cela revient à une forte hydratation des grains de ciment de ce béton.

L'hydratation qui est de plus en plus lente n'est jamais entièrement achevée, une petite partie de ciment reste non hydratée.

➤ Le suivi de température

Les mécanismes d'hydratation, et la sensibilité de la cinétique de durcissement au jeune âge des bétons, peuvent être différentes. Le «jeune âge» du béton correspond aux premières heures de l'histoire d'un béton et est souvent défini conventionnellement comme correspondant à la période s'étendant au-delà de la prise et durant laquelle la résistance du béton est inférieure à 50 % de sa valeur à 28 jours. [20]

On a effectué un suivi de température, sur une éprouvette pour chaque série de béton, en mettant un thermomètre au sein de chaque éprouvette avant que le béton durcisse, et d'enregistrer les valeurs de la température durant 24 h. les résultats trouvés sont réunies dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.2 Variation de la température des bétons en fonction du temps

Le temps (min)	La température en (C°)				
	BT	BL	BC	BS	BA
20	21,9	17,0	19,4	20,0	19,7
40	21,7	16,6	19,3	20,1	19,5
60	21,5	16,1	19,4	20,4	19,8
120	21,2	16,3	19,5	20,6	20,1
240	21,3	16,5	19,8	21,0	20,4
360	21,7	16,8	20,1	21,6	20,6
480	22,0	17,2	20,6	21,9	20,8
720	22,4	17,5	20,8	22,6	20,9
840	23,1	17,9	21,1	23,1	21,0
960	23,6	18,3	21,5	23,5	21,2
1080	24,0	18,4	21,1	23,9	21,4
1200	24,2	17,8	20,6	24,0	21,7
1320	23,9	17,3	20,2	23,6	21,9
1440	23,6	16,8	19,7	23,2	21,4

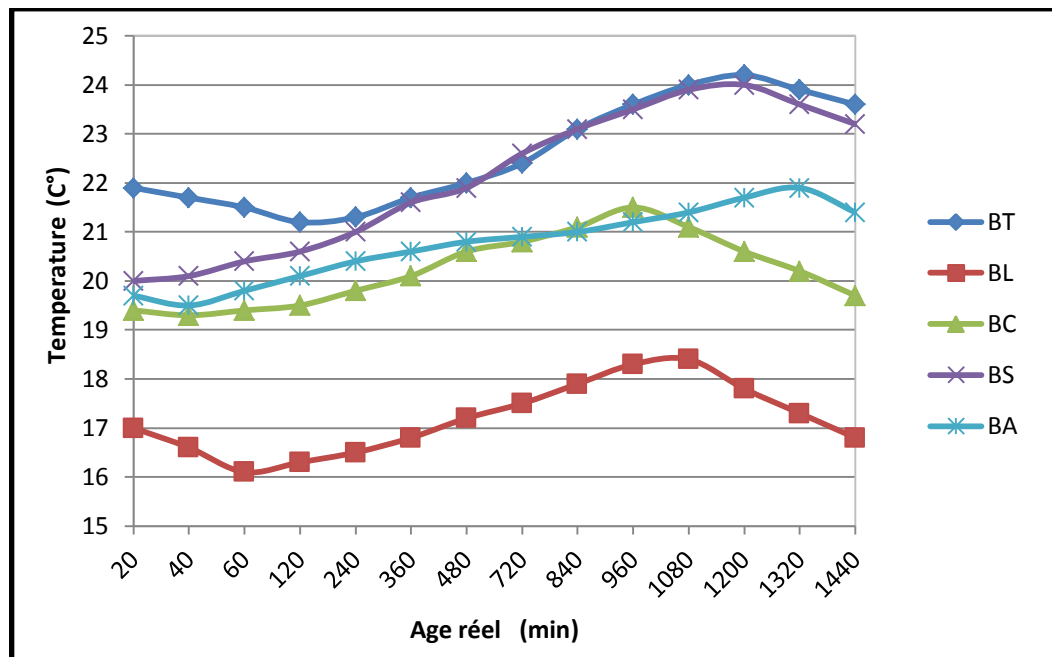


Figure III.6 : Variation de la température des bétons en fonction du temps

↳ Interprétation des résultats

Les relevées de température, montre une différence de la cinétique d'hydratation entre le béton témoin et celle du béton à base du ciment aux laitiers. On a remarqué cette différence lors de l'enregistrement de température, tel que le dégagement de chaleur du béton témoin et plus accéléré que celle du béton avec le ciment aux laitier. Selon **A PERTUE [16]**, l'évolution de la courbe de chaleur d'hydratation du ciment aux laitiers est moins importante que celle d'un ciment portland. Ce qui s'explique par le comportement des pourcentages de laitier qui est assez importants dans ce type de ciment.

On remarque que l'introduction des fillers siliceux fait accélérer le dégagement de chaleur de ce béton .cette accélération revient à l'effet de la silice, qui fait augmenter cette chaleur. Par contre les fillers calcaire, ont une allure presque semblable à celle du béton témoin, mais leur dégagement de chaleur et moins importants. **C.AMOURI [21]**, à montrer par son étude, l'interaction ciment fillers calcaire dans les mortiers peuvent avoir un effet retardateur plus important que l'effet accélérateur au jeune âge.

On ce qui concerne, l'effet d'adjuvant sur la cinétique d'hydratation de ce béton, on a remarqué lors de l'enregistrement l'effet retardateur sur la prise du ciment. Ce ralentissement dans l'hydratation va permettre à l'eau de continuer à fluidifier la pâte de ciment.

➤ **Essai de compression (NF P 18 - 406) [24]**

C'est l'essai le plus couramment utilisé sur béton durci. Les résultats de l'essai de résistance à la compression sont affectés par plusieurs paramètres : le type de l'éprouvette et ses dimensions, la préparation des faces d'essai etc.

Actuellement, cet essai est le plus révélateur des décisions à prendre pour juger de la qualité d'un béton durci.

↳ **But de l'essai**

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton, qui peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes.

↳ **Principe de l'essai**

Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la 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 qui est une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester.
- Un moyen pour rectifier les extrémités des éprouvettes : surfaçage au ciment prompt.

↳ **Le surfaçage des éprouvettes**

Conformément à la norme (**NF P 18-406**), l'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cylindriques dont les extrémités ont été préalablement rectifiées. En effet, La rectification consiste donc à rendre les surfaces de l'éprouvette planes.

↳ **Conduite de l'essai**

- L'éprouvette, une fois rectifiée elle doit être centrée sur la presse d'essai.
- Appliquer le chargement jusqu'à la rupture de l'éprouvette.
- Soit (S) la section orthogonale de l'éprouvette, la résistance f_{cj} , est exprimée en MPa

et a pour expression $f_{cj} = \frac{P}{S}$ Avec :

P : charge de rupture exprimée en MN.

S : surface de l'éprouvette exprimée en m^2 .

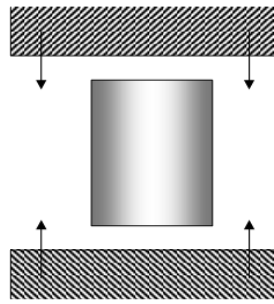


Figure III.7 L'essai à la compression

↳ Expression des résultats

Les résultats obtenus sont récapitulés dans l'annexe C, et ils sont représentés par la courbe suivante :

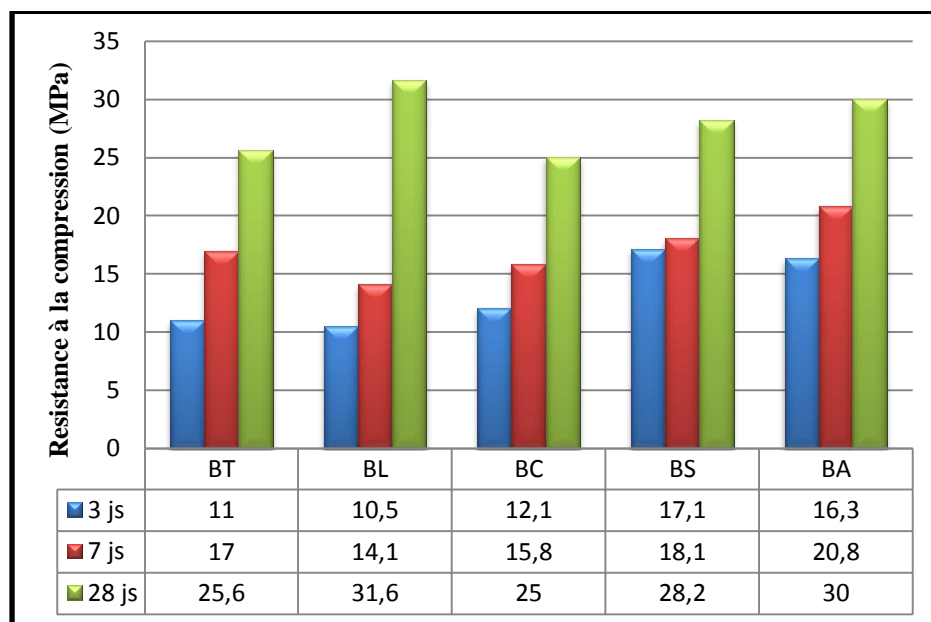


Figure III.8 Résistance à la compression en fonction de différentes séries du béton.

↳ Interprétation des résultats

Le béton à base de ciment aux laitiers donne des résistances moins importantes que celle du béton témoins au jeune âge, et une forte augmentation de cette résistance à 28 jours. Cela s'explique par le ralentissement de la chaleur d'hydratation qu'on a remarqué précédemment dans relevé de température et à la réaction pouzzolanique de ciment aux laitier.

L'introduction de fillers calcaires donne des résistances au jeune âge comparable à celle du béton témoins. Même constations pour la résistance à 28 jours.

Ce qui veut dire que les fillers calcaire ont un effet favorable grâce à leurs propriétés qui fait réduire le volume de vide et donne des résistances acceptables.

La figure III.7 montre que l'introduction des fillers siliceux, donne la meilleure résistance à 3 jours et une résistance comparable de celle du béton témoin à 7 jours. Cela revient à l'effet de la silice qui accéléré la réaction d'hydratation que nous avons constaté dans le suivi de température. La résistance donnée par les fillers à 28 jours est plus importante que celle du béton témoins, ce qui veut dire que la présence des fillers fait améliorer la résistance du béton pas uniquement au jeune âge mais aussi à long terme.

A partir de la figure III.7, on remarque que la résistance du béton avec un adjuvant augmente au fur et à mesure dans le temps. Leurs avantages sont considérables, les plus importants sont l'augmentation des résistances à tous les âges.

III.5 VERIFICATION EXPERIMENTALE DE LA RELATION DE BOLOMEY

L'essai de compression simple peut être reproductible s'il est exécuté en suivant rigoureusement les spécifications des normes. Des changements mineurs du mode opératoire peuvent avoir des effets importants.

La relation de Bolomey montre que dans les cas courants, ont une approximation suffisante (à condition de tenir compte de l'air occlus).celle-ci permet de discuter, d'une façon presque quantitative, d'un choix des constituants du béton et de leurs proportions pour la résistance. [5]

Les données expérimentales sur les moyens de régler la résistance à la compression correspondant aux grandeurs qui interviennent dans la relation de Bolomey sont: résistance normal du ciment, rapport E/C .avec la même relation on peut étudier aussi l'influence des additions. Cette relation sous forme suivante :

$$f_c = k_b * f_{cm} \left[\frac{C}{(E+V)} - 0,5 \right]$$

Avec : **C** et **E** désignent respectivement les masses de ciment et d'eau, **V** le volume d'air exprimé en masse du même volume d'eau ; **C**, **E** et **V** se rapportent au même volume de béton.

K_b : un coefficient caractérisant le squelette granulaire, c'est à dire l'ensemble forme par le sable et les gravillons. Pour les bétons courants dont la dimension maximale du

plus gros granulat D est comprise entre 12 et 32 mm, la valeur de K_b et comprise entre 0,5 et 0,6.

f_{mc} : c'est la résistance du mortier normal qui est la class du ciment (se trouve dans la fiche technique de ciment).

$V = Y.E$ tel que la valeur de y dépend de la consistance du béton comme il est indiqué ci-après.

Tableau III.3 les valeurs de y en fonction de la consistance [5]

Consistance	Y
Ferme	0,13
Plastique	0,10
Très plastique	0,07

Cas où l'on utilise une addition, il possible d'utiliser la relation de Bolomey en considérant le liant, composé par le mélange de $C \text{ kg/m}^3$ de ciment et de $A \text{ kg/m}^3$ d'addition : $L=C+A$.

➤ Processus d'étude sur un exemple (le béton BT)

Les données :

$E=178 \text{ L}$ et $C=356 \text{ Kg /m}^3$, ce qui doone un rapport de $C/E=2$.

$K_b = 0,55$ (La valeur de K_b comprise entre 0,5 et 0,6).

$V = Y \times E$ tel que $Y = 0,10$ pour une consistance plastique (BT).

$V = 0,10 \times 178 = 17,8$.

$f_{mc} = 42,5 \text{ MPa}$ (Class du ciment à 28 jours).

$f_{mc} = 20 \text{ MPa}$ (Class du ciment à 2 jours).

$$\Rightarrow \begin{cases} f_c = 42,5 \times 0,55 \times \left(\frac{356}{(178+17,8)} - 0,5 \right) = 30,8 \simeq 31 \text{ MPa.} \\ f_c = 20 \times 0,55 \times \left(\frac{356}{(178+17,8)} - 0,5 \right) = 14,5 \text{ MPa.} \end{cases}$$

Tableau III.4 Les valeurs calculé pour chaque série du béton

	E	C	C/E	V=Y.E	K_b	$f_{mc_{28}}$	f_{mc_2}	$f_{c_{28} \text{MPa}}$	$f_{c_2 \text{MPa}}$
BT	178	356	2	17,8	0,55	42,5	20	31	14,5
BL	178	356	2	23,14	0,55	42,5	10	29,68	8,98
BC	178	321	2	23,14	0,55	42,5	20	25,61	12,05
BS	178	321	2	23,14	0,55	42,5	20	25,61	12,05
BA	178	356	2	12,46	0,55	42,5	20	32	15,06

↳ **Interprétation des résultats**

On voit que les résultats obtenus expérimentalement et ceux déduits de la formule de Bolomey ne sont pas trop éloignés soit au jeune âge ou à 28 jours.

Il est impossible de raisonner uniquement sur les quantités sans tenir compte de l'effet de la composition chimique des constituants et leurs effets sur l'évolution des résistances. Mais on peut dire que cette relation donne des valeurs approximatives et ne peut jamais remplacer les résultats expérimentaux obtenus lors d'un écrasement d'éprouvette.

CONCLUSION

Les résultats obtenus dans cette étude peuvent mener aux conclusions suivantes :

Bien que la résistance à la compression, au jeune âge des bétons est réduite avec le ciment au laitier, ce dernier s'améliore en fonction du temps et atteint une bonne résistance à 28 jours.

L'introduction de 10% de fillers calcaires permet au béton de développer une résistance comparable à celle du béton témoin au jeune âge, ainsi qu'à 28 jours.

La substitution d'une partie de ciment par des fillers siliceux, permet d'avoir de bonnes résistances à tous les échéances (3, 7 et 28 jours).

L'emploi d'un adjuvant plastifiant donne des meilleures résistances, pas uniquement au jeune âge, mais aussi à 28 jours.

Malgré les différentes résistances obtenues par les différentes séries du béton, on peut dire que ces résistances sont acceptables à 7 jours (au jeune âge).

CONCLUSION GENERALE

Plusieurs paramètres, intervenant dans la formulation du béton, peuvent améliorer la résistance du béton au jeune âge, ainsi écourter les délais de fabrication. Certains chercheurs se sont penchés beaucoup plus sur l'effet positif des adjuvants incorporés individuellement dans les bétons ainsi que sur leurs modes d'introduction et leurs dosages. D'autres se sont intéressés aux additions minérales en présence de superplastifiants ou de plastifiants réducteurs d'eau. Nous avons choisi d'utiliser les paramètres suivants :

- Deux types de ciment différents, il s'agit du ciment portland composé, et le ciment aux laitiers de haut fourneaux.
- L'emploi d'adjuvants plastifiant réducteur d'eau.
- L'ajout de fillers calcaires et siliceux, qui sont substitués au ciment.

Les résultats obtenus à l'issue de nos essais nous permettent de bien constater l'influence de chaque paramètre utilisé dans la composition des différentes séries de béton, et plus particulièrement ce qui nous intéresse, leurs résistances au jeune âge.

Pour le même dosage des deux ciments dans les bétons, le besoin d'eau nécessaires pour le malaxage de chaque béton à base de ces deux ciments ne sont pas les mêmes. Ceci est expliqué par le fait que leurs compositions chimiques, et aussi, leurs surfaces spécifiques sont différentes. Ces dernières sont plus élevées pour le ciment CHF- CEM III que pour le ciment CPJ- CEM II. Ce qui conduit à une augmentation de besoin d'eau pour couvrir tous les grains de ciment et aussi ceux des autres constituants. A partir de ces données, on peut déduire que le béton BL consomme une quantité d'eau plus importante que celle consommée par le béton BT.

L'évolution de la résistance à la compression est plus élevée pour le béton BT que pour le béton BL au jeune âge. Cela revient au dégagement de chaleur dans le ciment CPJ-CEMII, qui conduit à une élévation de la chaleur d'hydratation importante que celles de ciment CHF-CEMIII. Pour cette raison on a obtenue des résistances plus importantes au jeune âge que celle du béton avec le ciment au laitier. À 28 jours, une augmentation de résistance à la compression du béton confectionné avec le ciment CHF-CEMIII, ces résistances sont supérieures à celles du béton témoin à cause de pourcentage élevé des laitiers dans ce ciment (effet pouzzolaniques).

L'introduction des fillers permet de remarquer leur effet sur la consistance. Cela s'explique par le rôle que jouent les fillers dans nos bétons. il faut plus d'eau pour disperser ses particules, la teneur en fines nécessite une grande quantité d'eau. L'effet fillers réduit la porosité, d'où un béton plus dense et plus compacte et par conséquent une bonne résistance.

La résistance donnée par les fillers calcaires et comparable avec celle du béton témoin. Par contre, il apparait que les bétons à base des fillers siliceux présente une meilleure résistance au jeune âge, et à 28 jours.

En comparant les deux valeurs de consistance donnée par les deux bétons BT (béton témoin) et BA avec un plastifiant, ils présentent un écart important entre les deux valeurs. La raison est que le plastifiant joue un rôle de défloculation des grains de ciment et permet de libérer l'eau piégée entre eux. L'incorporation du plastifiant dans le béton permet non seulement d'améliorer l'ouvrabilité du béton, et aussi leur résistance à la compression. La résistance obtenue par le BA avec un plastifiant plus important que celle du béton témoin à toutes les échéances.

A partir des conclusions rapportées précédemment, il apparait qu'afin d'améliorer la résistance au jeune âge des bétons, on doit utiliser des fillers siliceux et des adjuvants plastifiant, qui donne des meilleures résistances à la compression.

L'introduction des fillers calcaire, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la durabilité des bétons [21]. Un remplacement d'une partie du ciment, permet de développer des résistances acceptables.

L'utilisation de ciment aux laitiers de haut fourneau, tend à diminuer sensiblement les résistances initiales (au jeune âge) et à augmenter les résistances finales par rapport au ciment portland composé.

La bonne gestion des opérations de décoffrage des ouvrages en béton, nécessite une mesure fiable de la résistance du béton dans l'ouvrage. Malheureusement, le matériel dont nous avons disposé pour effectuer nos expériences est insuffisant. Pour cette raison on propose comme une recommandation d'étudier la résistance du béton au jeune âge par l'application de la loi d'Arrhenius qui basé sur le calcul de l'âge équivalent.

Pour appliquer cette loi, on aura besoin d'avoir :

- ◆ L'énergie d'activation apparente des deux types de ciment.
- ◆ la courbe de résistances de référence à partir des écrasements qui sont effectués sur les éprouvettes au jeune âge.
- ◆ un suivi de températures au sein des éprouvettes.
- ◆ convertir les résultats obtenus en temps équivalent, manuellement à l'aide de la loi d'Arrhenius.

L'âge équivalent sera nécessaire pour déterminer l'évolution des résistances au jeune âge et connaître, ainsi les délais de décoffrage du béton. C'est outil précieux que chaque chantier se doit de posséder pour décoffrer en toute sécurité et gagner plus de temps.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

- [1] G.DREUX, et J. FESTA : « Nouveau guide du béton ».Édition Eyrolles.1997.
- [2] V.PHOUMMAVONG «Cours en ligne Matériaux de Construction» Université National Laos 2006.
- [3] commission permanente de la normalisation des matériaux de construction : « Composition et Spécification » clauses technique. Ciment C.T.2/1994
- [4] R.DALLEMAGNE et J.GOURGAND: «les bétons dans la construction» .CIB béton.2005.
- [5] J .BARON, et J.P.OLIVIER:« Les bétons bases et données pour leur formulation». Édition Eyrolles.1999.
- [6] G.CHANVILLARD :« le matériau béton: connaissance générales». Édition Aléas 1999.
- [7] M. ADAM, et NEVILLE: «Propriétés des bétons ».Édition Eyrolles.2000
- [8] 4^{ème} séminaire sur les technologies du béton: « le béton : durabilité, solutions et innovation ».Édition Lavoisier 2007.
- [9] Construction Chemicals France:« Technologie de béton ».BASF.2001
- [10]G.ARQUIE V et C.TOURENQ:« granulats »Édition Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.1998.
- [11] Holcim Bétons « Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables » Une publication de Holcim (Belgique) S.A.2007.
- [12] N.CHALOUAH: «Cours 3^{ème} année licence sur les matériaux de construction». Université de Bejaia. 2010
- [13] A. TAGHNIT-HAMOU «Cours de matériaux de construction : L'hydratation du ciment portland » Université de SHERBROOKE 2008.
- [14] A. BRESSON« Influence de la minéralogie sur le comportement des mortiers de ciment au jeune âge» Université de Laval 2009.
- [15] A. PISCH et B.ALBERT : « formation ciment » Lafarge. 2009.

- [16] A.PERTUÉ : Thèse de Doctorat « étude expérimentale du retrait endogène, du fluage propre et de la fissuration des matrices cimentaires aux jeune et très jeune âges» Université de Nantes 2008.
- [17] PROJET NATIONAL CALIBE : Résistance du béton dans l'ouvrage-Guide d'utilisation de la maturométrie
- [18] E. Gallucci, X. Zhang, K.Scrivener,: «Influence de la température sur le développement microstructural des bétons» .Laboratoire de Matériaux de Construction, EPFL Toulouse, France 2006.
- [19] R.DUPAIN et R.LANCHON et J.C.ARROMAN :« Granulats, sols, ciments et Bétons» .Édition Casteilla 2004.
- [20] P.ACKER et J.M.TORRENTI et F.J.ULM: « Comportement du béton au jeune âge ».Édition Lavoisier 2004.
- [21] C.AMOURI: thèse en doctorat : « Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) »UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE.2009
- [22]A.ALI AICHOUBA, M.GHRICI, A.BENAISSA « effets de la pouzzolane naturelle de beni-saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire ». Colloque CMEDIMAT 2005.
- [23] A Kerbouche, M. Mouli, L. Laoufi, Y. Senhadji, S. Benosmane : « influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers »ENSET Oran 2009.
- [24] M^{eme} S.ATTIL : « TP 3^{eme} année licence sur les matériaux de construction » Université de Bejaia. 2010
- [25] S.KHERBACHE :« Etude de l'influence de l'ajout de particules fines dans les sables concassé sur le retrait et la résistance des bétons » Université de Bejaia. 2006.
- [26] S.KHERBACHE et R.GOUDJIL : « Influence des fines contenus dans les sables concassé sur la résistance des bétons ». Université de Bejaia. 2003
- [27] F.GOUMARI «Les méthodes de formulation de béton » Université ABOUBEKR BELKAID.

ANNEXE A

MOKAOUEM
Ciment pour béton en milieux agressifs
CHF CEMIII/B 42,5-ES NA 443



FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT MK.A v02

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	1,00 – 3,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	<0,7
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 – 2,50
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,9 – 2,2
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,012 – 0,025

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Aluminates tricalciques C ₃ A (%):	≤ 5
(C ₄ AF) + 2(C ₃ A)	≤ 20%

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25,5 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	3 000 – 3 650
Chaleur d'hydratation J/g	< 270
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	<5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	145 à 185
Fin de prise (min)	230 à 280

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10
28 jours (MPa)	≥ 42,5

Algerian Cement Company (SNA)
Bordj Bouhassene Djafarzade (BOC)
Tel : +213 30 30 79 29
Fax : +213 30 30 76 30

Direction générale
33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tel. : +213 (0) 21 48 10 65
Fax : +213 (0) 21 48 10 71

Ciment Stone Algérie (SPA)
Usine Oujda (CBA)
BP EF, 23250, Mascara
Tel / Fax : +213 (0) 45 84 88 88



FICHE TECHNIQUE		
MATINE Ciment pour béton exigeant <small>CEM II/A 42,5 R NA 42</small>	Analyses et caractérisation	
	Analyses chimiques	
	Perte au feu (%), (NA 5042):	7.00 – 9.50
	Résidus insolubles (%), (NA 5042):	1.5– 3.0
	Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2.00 – 2.50
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%) :	1.90 – 2,30
	Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,03
	Composition hypothétique du clinker (Bogue)	
	Silicates tricalciques C ₃ S (%) :	58.00 – 64.00
	Aluminates tricalciques C ₃ A (%) :	6,0– 8,00
	Propriétés physiques	
	Consistance normale de la pâte de ciment (%) :	25,5 – 28,00
	Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4300 – 4 800
	Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
	Expansion en mm	0,5 – 2.5
	Temps de prise à 20°C (NA 230)	
	Début de prise (min)	120 - 180
	Fin de prise (min)	210 - 280
Résistance à la compression (NA 234)		
02 jours (Mpa)	> 20	
28 jours (Mpa)	≥ 42.5 & 62,5	

MEDAFUID 40

Norme EN 934-2, TAB 1 ET
B 10, NA 774

Plastifiant / réducteur d'eau**DESCRIPTION**

Le **MEDAFUID 40** est un plastifiant réducteur d'eau. Il est compatible avec tous les types de ciment.

DOMAINES D'APPLICATION

Le **MEDAFUID 40** est recommandé pour la confection des bétons suivants :

- Béton prêt à l'emploi
- Béton pompé sans forme de ségrégation
- Béton de masse
- Fabrication de dalles et pré-dalles
- Bétons BCR
- Bétons extrudés

PROPRIÉTÉS :

Grâce à ses propriétés physico-chimiques, le **MEDAFUID 40** permet :

Sur béton frais :

- Diminuer le rapport E/C
- Augmenter le slump
- Faciliter la mise en œuvre du béton
- Éviter la ségrégation

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques
- Augmenter la compacité
- Augmenter l'imperméabilité
- Augmenter la durabilité
- Éviter la formation de nids d'abeilles

Résistances mécaniques en compression
(béton dosé à 350 kg/m³, E/C=0,42, Aff=11cm)

Désignation	Rc (MPa)	
Jours	7J	28J
Témoin	22,5	28,0
MEDAFUID 40 (1,5%)	28,5	36,30

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Marron
- pH 8 / 9
- Densité 1,19 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 40 %

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFUID 40** peut être ajouté dans la bétonnière à la confection du béton ou dans les camions malaxeurs :

a) Dans la bétonnière il s'ajoute dans la deuxième partie de l'eau de gâchage et doit être suivi d'un malaxage d'environ 2 minutes.

b) Dans le camion malaxeur, le **MEDAFUID 40** est introduit dans la toupie à l'arrêt et malaxé à grande vitesse pendant environ 1 minute par mètre cube de béton.

Ne pas ajouter le **MEDAFUID 40** sur le béton sec.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,8 à 2,0% du poids de ciment. Soit 0,67 L à 1,68 L d'adjuvant pour 100 kg de ciment.

Des dosages supérieurs à 1,5% du poids de ciment (soit 1,2 l d'adjuvant par 100kg de ciment) permettent d'obtenir un retard de début de prise du ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFUID 40** est conditionné en bidons de 12 et 24 kg, fûts de 265 kg, cubi ténaire de 1200 kg. La température dans l'entrepôt de stockage doit être comprise entre 5°C et 35°C.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



66

Granitex

Zone Industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



ANNEXE C

Tableau 1. Les valeurs de résistances, d'affaissement et de l'aire occlus en fonction des différentes séries du béton

	N°	BT	BL	BC	BS	BA
3 jours	1	11	10,5	10,9	17,7	15,6
	2	11	10,8	13,5	14,2	17,7
	3	11	8,6	11,9	19,4	15,6
	moy	11	10,5	12,7	18,5	16,3
7 jours	4	17	16,4	14,3	18,4	21,2
	5	18,3	13,6	17,4	17,4	20,5
	6	16,2	12,9	15,7	18,7	20,8
	moy	17,6	15	16,5	18,5	20,8
28 jours	7	25,8	29,6	25,5	28,1	31,7
	8	22,8	29,9	24,1	29,5	28,3
	9	25,5	35,5	25,6	26,4	30,4
	moy	25,6	31,6	25,0	28,2	30,0
Affaissement	cm	6	2	1,5	4	16,5
L'air occlus	%	1,4	1,5	1,3	1,3	2,5

Tableau 2. Les valeurs de la masse volumique en fonction des différentes séries du béton

	BT	BL	BC	BS	BA
0 jours	15776	15763	15572	15624	15412
1 jours	15622	15672	15508	15537	15261
3 jours	15666	15713	15594	15605	15322
7 jours	15733	15727	15618	15625	15334
14 jours	15806	15746	15665	15680	15342
21 jours	15813	15756	15663	15665	15358
28 jours	15819	15763	15664	15663	15360

Résumé

L'accélération des cadences de travail imposées par les producteurs exige de trouver des moyens et des techniques nécessaires pour améliorer rapidement les temps de prise et de durcissement du béton ainsi que sa résistance à la compression au jeune âge. Cela nécessite évidemment des moyens qui permettent d'augmenter cette résistance.

L'optimisation à court terme des opérations de construction sur chantier telle que le décoffrage, passe d'abord par un travail de formulation : choix du ciment, du rapport E/C, des adjuvants, des additions minérales, etc, et nécessite la connaissance de la résistance du béton dans l'ouvrage.

La température de cure a un rôle majeur sur le développement des propriétés mécaniques du béton. Au jeune âge, tout montre que c'est simplement l'augmentation du degré de réaction qui est responsable des résistances plus élevées à haute température. Dans ces conditions, il est clair que la résistance à court terme, mesurée sur des éprouvettes normalisées, n'est généralement pas représentative de la résistance du béton dans l'ouvrage.

Des nouvelles notions telles que l'énergie d'activation et l'âge équivalent, permettent de prendre en considération l'effet de la température sur l'avancement des réactions d'hydratation du ciment, et une nouvelle technique de la maturométrie permet d'évaluer la résistance du béton à court terme en tenant compte de l'énergie d'activation et l'âge équivalent, donc l'effet couplé de la température et du temps sur la résistance d'un béton. Tous ces points et ces paramètres qui influent sur la résistance du béton au jeune âge sont les objectifs de notre recherche.

Mots-clés : béton, résistance, jeune âge.

Abstract

The Acceleration of the rate of work imposed by the producers requires to find the necessary means and techniques in order to quickly improve the time of setting and hardening of concrete; as well as, its compressive strength at first stage. This, of course, requires averages which enable to increase this resistance.

The short term optimization of building operation on-site such stripping, begins with a formulation work: choice of cement, the W/C ration proportion of adjuvant, alloying elements , etc. and requires the knowledge of the strength of concrete on the project.

Curing temperature has a major role in the development of mechanical properties of concrete .At first stage; everything seems to show that it is simply the increasing of the degree of reaction which is responsible for higher resistance to high temperature. In these conditions, it is clear that the strength at short-term, measured on standard specimens is not generally representative of the strength of concrete in the structure.

New concepts such as activation energy and the equivalent age, allows to consider the effect of temperature on cement hydration reactions, it is a new technique of maturométrie which allows the evaluation of concrete strength in short term, taking into consideration the activation of the energy and the equivalent age; therefore, the coupled effect of the temperature and time on the strength of the concrete. All these points and the influent parameters on the strength of the concrete at first age are the objectives of our researches.

Keywords: concrete, résistance, first stage.