



UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA



Faculté de Technologies
Département de Génie Civil



جامعة بجاية
Tasdawit n' Bgayet
Université de Béjaïa



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : Matériaux et Structures

THÈME

**L'étude du comportement physico-mécanique
du béton ordinaire, béton adjuvanté(SP) et du
béton avec des fillers calcaires avec différents
dosages en ciment**

Réalisé par :

- *ALIOUA. Selma*
- *HAMZA. Yasmine*

Dirigé par :

M^{me} SELLAMI. Asma

Devant le jury composé de:

- *M^{me} S.ATTIL*
- *M^{me} S.AREZKI*

Remerciements

Avant tout nous remercions ALLAH le tout puissant pour nous avoir donné la force, la patience et la volonté de mener à bien notre travail.

Notre profonde gratitude va aussi à notre promotrice, Mme A. SELLAMI pour l'honneur qu'elle nous a fait en nous encadrant, pour ses précieux conseils et encouragements, ses disponibilités et orientations et surtout pour la confiance placée en nous, dont nous garderons les souvenirs de ses qualités profondément humaines.

Nos sincères remerciements vont aussi à :

Mr Dj. ZOUBIRI, le technicien des laboratoires bétons de l'université, pour tout son aide, ses orientations et surtout sa patience durant toute la période pratique au laboratoire.

M^{me} S. ATTIL pour l'honneur qu'elle nous a fait d'avoir accepté de présider le jury d'examinations.

M^{me} S. ARZKI pour l'honneur qu'elle nous a accordé en examinant ce modeste travail.

Selma & Yasmine

Dédicaces

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce modeste travail:

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin ; ma chère maman, ma plus belle étoile qui a attendu avec impatience les fruits de sa bonne éducation et mon cher père, mon ami qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grandes femmes. (Aucun mot ne peut signifier à quel point je vous suis reconnaissante).

A mes très chères sœurs : Imane, Narimène et Aya, à qui je souhaiterai tout le bonheur du monde.

A la mémoire de mes grands-parents.

A mon bien aimé qui était toujours à mes côtés.

A toute ma famille.

A ma chère binôme et sa famille.

A mes meilleurs ami (es) et tous ceux qui me sont chers.

A toute ma promotion GC.

Selma

Dédicaces

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers parents qui ont sacrifié leur vie pour notre réussite et nous ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux, que dieu leur prête bonheur et longue vie.

À mon très cher mari, quand je t'es connu j'ai trouvé l'homme de ma vie, mon âme sœur et la lumière de mon chemin ; tes sacrifices ton soutien moral m'ont permis de réussir mes études.

À ma princesse et ma raison de vivre ma fille Ariam tu es tout ce que j'ai de plus cher au monde je t'aime mon ange.

À mes adorables frères : Wissem ,Wassim ,Sofiane et Youcef ainsi que leurs femmes et leurs enfants .

À ma petite sœur Sérine pour son soutien et ses encouragements.

À ma tante Hakima puisse dieu, le très haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

À ma très chère binôme Selma et sa famille.

À mes chères amies : Nina et son mari Aziz , mes amis et frère Mounir et Adel ainsi que Saïd.

Yasmine

Aime

Tables des matières :

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des notations	
Introduction générale	2
Chapitre I : Etude bibliographique	
I.1. Généralités sur le béton	5
I.1.1. Introduction	5
I.1.2. Historique	5
I.1.3. Définition du béton ordinaire	6
I.1.4. Les constituants du béton	7
I.1.4.1. Granulats	7
I.1.4.1.1. Le gravier	9
I.1.4.1.2. Le sable	10
I.1.4.2. L'eau de gâchage	11
I.1.4.3. Ciment	11
I.1.5. Rôle des différents constituants du béton	26
I.1.6. Fabrication du béton	26
I.1.7. Les caractéristiques physiques et mécaniques	27
I.1.8. Domaine d'emploi	29
I.1.9. Avantages et inconvénients du béton	30
I.2. Généralités sur le béton adjuvanté	31
I.2.3. Les différents adjuvants	32
I.2.4. Rôle des adjuvants	36
I.3. Généralités sur le béton avec les additions minérales	37

I.3.3. Types d'additions minérales	37
I.3.2.1. Les fillers de calcaire (FC)	38
I.3.2.2. Effet des fillers calcaires en général	39
I.3.2.3. Influence des fillers de calcaire sur les propriétés du béton	39
I.4. Conclusion	40

Chapitre II : Caractérisation des matériaux et Méthodes expérimentales

II.1. Introduction	42
II.2. Caractéristiques physiques	42
II.2.1. Masse volumique apparente	42
II.2.2. Masse volumique absolue	44
II.2.3. Analyse granulométrique	45
II.3. Caractéristiques du ciment	52
II.3.1. La consistance normale	53
II.3.2. La prise du ciment	54
II.4. Caractérisation des fillers calcaire	56
II.5. Caractérisation du superplastifiant	56
II.6. Eau de gâchage	56
II.7. Formulation du béton	57
II.8. Elaboration des mélanges	59
II.8.3. Caractéristiques physiques du béton élaboré	63
II.8.4. Caractéristiques mécaniques du B.O, du béton adjuvanté et du béton avec FC	68
II.9. Conclusion	73

Chapitre III : Résultats expérimentaux et Discussions

III.1. Introduction	75
III.2. Les caractéristiques physiques des bétons	75
III.2.1. Affaissement au cône d'Abrams	75
III.2.1.1. Béton ordinaire	75

III.2.1.2. Béton adjuvanté (SP)	76
III.2.1.3. Béton avec Fillers de Calcaire (FC)	76
III.2.2. Masse volumique	77
III.2.2.1. Béton ordinaire	77
III.2.2.2. Béton adjuvanté (SP)	77
III.2.2.3. Béton avec Fillers de Calcaire (FC)	78
III.3. Les caractéristiques mécaniques des bétons	79
III.3.1. Essai destructif ; Essai de compression	79
III.3.2. Essais non destructifs	81
III.3.2.1. Scléromètre	81
III.3.2.2. Ultrason	82
III.4. Conclusion	84

Liste des figures :

Figure I.1 : Broyage du clinker	16
Figure I.2 : Schéma de fabrication du ciment portland	19
Figure I.3 : Le mécanisme de réaction de superplastifiant avec le ciment	33
Figure I.4 : Schéma de l'influence d'un accélérateur comparé à un retardateur sur l'évolution des résistances	34
Figure I.5 : Résultats observés avec entraîneur d'air et sans entraîneur d'air	36
Figure II.1 : Matériels utilisés pour l'essai de la masse volumique apparente	43
Figure II.2 : Matériels utilisés pour l'essai de la masse volumique absolue	44
Figure II.3 : Matériaux utilisés	45
Figure II.4 : Tamiseuse électrique	47
Figure II.5 : Courbe granulométrique	50
Figure II.6 : Mesure de l'ES	51
Figure II.7 : Ciment utilisé	52
Figure II.8 : Appareil de Vicat	54
Figure II.9 : Essai de la prise du ciment	55
Figure II.10 : Superplastifiant utilisé	56
Figure II.11 : Courbe de référence	58
Figure II.12 : Les différentes étapes d'élaboration d'un béton	64
Figure II.13 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams	65
Figure II.14 : Cône d'Abrams utilisée	65
Figure II.15 : Essai de l'affaissement du B.O avec 250 kg du ciment	66
Figure II.16 : Essai de l'affaissement du B.O avec 300 kg du ciment	66
Figure II.17 : Essai de l'affaissement du B.O avec 350 kg du ciment	66
Figure II.18 : Essai de l'affaissement du B.Adj avec 250kg du ciment	66
Figure II.19 : Essai de l'affaissement du B.Adj avec 300kg du ciment	66
Figure II.20 : Essai de l'affaissement du B.Adj avec 350kg du ciment	66
Figure II.21 : Essai de l'affaissement du B.FC avec 250kg du ciment	67
Figure II.22 : Essai de l'affaissement du B.FC avec 300 kg du ciment	67
Figure II.23 : Essai de l'affaissement du B.FC avec 350 kg du ciment	67

Figure II.24 : Confection des éprouvettes	67
Figure II.25 : exemple de masse d'un béton à l'état frais et à l'état durcis	68
Figure II.26 : Essai de compression	70
Figure II.27 : Le scléromètre	70
Figure II.28 : L'essai au scléromètre	71
Figure II.29 : Abaque sclérométique	72
Figure II.30 : L'essai à l'ultrason	72
Figure III.1: Affaissement de B.O avec différents dosages du ciment	76
Figure III.2: Affaissement de B.Adj avec différents dosages du ciment	77
Figure III.3 : Affaissement de B.FC avec différents dosages du ciment	77
Figure III.4: Masse volumique de B.O avec différents dosages du ciment	78
Figure III.5: Masse volumique de B.Adj avec différents dosages du ciment	79
Figure III.6: Masse volumique de B.FC avec différents dosages du ciment	79
Figure III.7: Résistance en compression des bétons avec différents dosages en ciment.....	80
Figure III.8: Résistances en compression des différents bétons étudiés.....	81
Figure III.9: Résistances en scléromètre des bétons avec différents dosages du ciment.....	81
Figure III.9: Résistances en scléromètre des bétons avec différents dosages du ciment.....	82
Figure III.11: Résistance à l'ultrason des bétons avec différents dosages du ciment.....	82
Figure III.12: Résistances à l'ultrason des différents bétons étudiés.....	83

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant	6
Tableau I.2 : Désignation des granulats (XP18-545)	7
Tableau I.3 : Les caractéristiques recherchées pour les granulats	9
Tableau I.4 : Les classes de résistance de ciments	22
Tableau I.5 : Principaux pays producteurs du ciment en 2013	25
Tableau II.1 : Masse volumique apparente des matériaux	43
Tableau II.2 : Masse volumique absolue des matériaux	45
Tableau II.3 : Analyse granulométrique du sable	48
Tableau II.4 : Analyse granulométrique du gravier G ₁ (8/15)	49
Tableau II.5 : Analyse granulométrique du gravier G ₂ (15/25)	49
Tableau II.6 : Résultats obtenus pour l'ES	52
Tableau II.7 : Résultats obtenus pour la consistance normale	54
Tableau II.8 : Résultats obtenus pour la prise du ciment	56
Tableau II.9 : Le rapport C/E en fonction du dosage du ciment	57
Tableau II.10 : Dosage en eau en fonction du dosage du ciment	58
Tableau II.11 : Composition d'un B.O pour 1 m ³ avec 250 kg du ciment	60
Tableau II.12 : Composition d'un B.O pour 1 m ³ avec 300 kg du ciment	61
Tableau II.13 : Composition d'un B.O pour 1 m ³ avec 350 kg du ciment	61
Tableau II.14 : Composition d'un B.Adj pour 1 m ³ avec 250 kg du ciment	61
Tableau II.15 : Composition d'un B.Adj pour 1 m ³ de 300 kg du ciment	62
Tableau II.16 : Composition d'un B.Adj pour 1 m ³ de 350 kg du ciment	62
Tableau II.17 : Composition d'un B.FC pour 1 m ³ avec 250 kg du ciment	63
Tableau II.18 : Composition d'un B.FC pour 1 m ³ de 300 kg du ciment	63
Tableau II.19 : Composition d'un B.FC pour 1 m ³ de 350 kg du ciment	63
Tableau II.20 : Masse volumique du B.O	68

Tableau II.21 : Masse volumique du B.SP	68
Tableau II.22 : Masse volumique du B.FC	69
Tableau II.23 : La qualité du béton en fonction de la vitesse du son	73

Liste des notations :

SP : Superplastifiant.

FC : Fillers de Calcaire.

ES : Equivalent de Sable.

LAFARGE : Lafarge est un groupe français de matériaux de construction, leader mondial dans son secteur.

d/D : Rapport dimensions minimales/Dimensions maximales.

NF - EN : Norme Française. (AFNOR).

E/C : Rapport Eau/Ciment.

CaCO₃ : Carbonate de Calcium.

CaSO₄ : Sulfate de Calcium.

SiO₂-Al₂O₃ : Oxyde de Silice – Oxyde d'aluminium.

CO₂ : Oxyde de Carbone.

Cru : Farine de grande finesse obtenue par le broyage de calcaire et d'argile, dans une proportion voisine de 80% - 20%.

DIB : Déchets industriels Banals.

DSB : Désactivant de Surface des dallages en Béton.

EMC : Energetically Modified Cement. (Ciment énergétiquement modifié).

CEM : désigne le classement d'un ciment en fonction de sa composition et de sa résistance normale. On parle de CEM I (ou CPA dans la notation française), CEM II (ou CPJ), CEM III (ou CHF), CEM IV (ou CPZ) et CEM V (ou CLC)

ES : est le sigle de l'équivalent de sable qu'on peut trouver dans un granulat.

PH : Potentiel Hydrogène.

HL : Chaux Hydraulique.

NHL : Chaux Hydraulique Naturelle.

R* : Prise rapide.

Liste des notations

CaCl₂ : Chlorure de Calcium.

C-S-H : Silicate de Calcium Hydraté.

USA : United States of America (États-Unis d'Amérique).

BHP : Béton à Hautes Performances. Béton dont les résistances élevées et la durabilité sont liées à leur faible porosité.

Granitex : Est une société spécialisée dans la conception, la fabrication et la commercialisation des adjuvants pour béton de construction.

ρ : Masse volumique apparente.

ρ_s : Masse volumique absolue.

M_f : Module de finesse.

Refus : poids de matériau retenu par le tamis.

Tamisât : poids de matériau passant par le tamis.

G₁ : Gravier de fractions (8/15).

G₂ : Gravier de fractions (15/25).

LAFARGE : est un groupe français de matériaux de construction, leader mondial dans son secteur.

Granitex : est une société spécialisée dans la conception, la fabrication et la commercialisation des adjuvants pour béton de construction.

B.O : Béton Ordinaire.

B.Adj : Béton Adjuvanté.

B.FC : Béton avec Fillers de Calcaire.

Introducción General

Introduction générale :

A l'origine, le béton était constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la plupart des cas, le ciment était du ciment Portland obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis broyé. Par la suite, de petites quantités d'adjuvants chimiques ont été ajoutées au mélange afin d'améliorer certaines des propriétés du béton à l'état frais ou durci. Plus tard, d'autres matériaux de nature inorganique ont été utilisés dans le béton, pour des raisons économiques dans la plupart des cas. Ces substances inorganiques sont moins coûteuses que le ciment portland en raison de leur disponibilité à l'état naturel. Au 20^{ème} siècle, le béton se développera considérablement avec l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint en 1928 par Eugène Freyssinet, ouvrant ainsi la voie à une envolée de l'audace architecturale (ouvrages d'art, bâtiments, etc.). [1]

La résistance du béton est le paramètre le plus important pour apprécier la qualité du béton. Pour cette raison, plusieurs chercheurs ont développé des modèles de corrélation empirique reliant les résistances du béton et les mesures non destructives correspondantes. Ces modèles proposés sont uniquement appropriés aux matériaux et environnement similaires à ceux desquelles les modèles sont établis. Cependant, l'utilisation de ces modèles pour estimer la résistance des bétons produits dans les chantiers algériens donne lieu souvent à des résultats contradictoires lors de leur comparaison avec ceux observés par les essais aux carottes. Ceci montre clairement la nécessité de développer des corrélations spécifiques aux bétons à base des matériaux locaux et reflétant les conditions et les pratiques de nos chantiers. [2]

L'objectif principal de ce mémoire est d'élaborer un bon béton résistant et moins coûteux en étudiant le potentiel d'un nouveau type du béton qui diffère dans les quantités du ciment utilisées, nous avons utilisé 3 dosages du ciment : 250 kg, 300kg et 350 kg pour les différents types du béton : béton ordinaire, béton adjuvanté avec des superplastifiants (**SP = 1.8%**), béton avec des fillers calcaires (**FC = 30%**). Nous étions intéressées aux masses volumiques, l'affaissement, la résistance à la compression, au scléromètre et à l'ultrason.

Ce mémoire contient trois chapitres essentiels :

Le premier a été consacré pour l'étude bibliographique, étude théorique sur le béton en général, et en particulier, le béton avec des adjuvants et le béton avec des additions minérales.

Le deuxième a été basé sur la présentation des différentes méthodes et procédures de caractérisation des matériaux entamées au sein du laboratoire de génie civil à l'université ;

Et pour le dernier chapitre, nous avons traité et interprété les résultats obtenus de notre recherche.

CHAPITRE I
Etude bibliographique

I.1. Généralités sur le béton :

I.1.1. Introduction :

Le béton depuis son origine, a été réalisé à partir des composants de base qui sont : le ciment, les granulats et l'eau. Le ciment constitue la phase liante du béton, avec une taille de grains comprise entre 1 et 100 μm (micromillimètre) ; le sable, avec une taille de grains comprise entre 0 et 5 mm et les granulats ou graviers de grosseur comprise entre 5 et 25 mm.

Il existe dans la nature sous forme de poudingues calcaires et siliceux, mais c'est aussi un matériau qui est mis en œuvre par l'homme. D'abord d'une manière pragmatique dans la maçonnerie romaine qui était faite de cailloux noyés dans un mortier pouzzolanique, puis de manière plus scientifique à partir du 19^{ème} siècle.

Aujourd'hui, il est le matériau le plus utilisé dans tous les domaines de construction qu'il s'agisse du bâtiment ou des ouvrages d'art comme les ponts ou barrages ou encore dans les pistes d'atterrissage ou jetées de ports.

Si le matériau est plastique donc modulable lors de sa fabrication, il acquiert ses propriétés mécaniques au cours du temps. Une fois mature, le béton doit être considéré comme un composite constitué de granulats et d'une pâte du ciment durcie, dont les propriétés dépendent, en grande partie, de sa formulation.

L'évolution des connaissances du matériau, les exigences nouvelles en matière de propriétés ont incité les chercheurs et les industriels à introduire dans les formulations de nouveaux produits afin d'obtenir des propriétés recherchées. Ainsi, actuellement, assiste-t-on à une large variété de gammes de béton pour répondre à la forte demande des industriels. S'appuyant sur les connaissances de ces nouveaux matériaux. Il s'agit là de réaliser des ouvrages avec des compositions de béton répondant aux critères exigés définis pour chaque ouvrage. [3]

I.1.2. Historique :

L'ingénieur Bélidor, auteur de *L'architecture hydraulique* (1737) a étudié la composition du béton et introduit le mot béton dans son sens actuel. L'invention du ciment par Louis Vicat en 1817, celle du ciment Portland par Aspdin en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de **Lafarge** au Teil en 1830 préparent l'avènement du béton. Les premières cimenteries se développent en France entre 1850 et 1860, dans le Boulonnais avec la Société des Ciments Français.

C'est en fait le mariage ciment-métal, appelé ciment armé, puis béton armé, qui va donner au béton son plein essor. Le premier exemple est la barque de Lambot (1848), le plus significatif, l'immeuble Hennebique à Paris (1898).

Au XX^{ème} siècle, le béton se développera considérablement et, parallèlement, l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt, à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint par Freyssinet. Plus récemment, les progrès réalisés dans les bétons de hautes performances lui donnent ses lettres de noblesse dans le bâtiment, avec une réalisation comme l'Arche de la Défense, ou en génie civil : pont de l'Île de Ré, pont sur l'Elorn, pont de Normandie, Viaduc de Millau. [4]

I.1.3. Définition du béton ordinaire :

Le béton est un mélange de plusieurs composants : granulats, sable, eau, ciment, et le plus souvent, adjuvants qui constituent un ensemble homogène. Les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0,5 μm (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons).

Dans les bétons où une très grande compacité est recherchée (tels que les Bétons à Hautes Performances, par exemple), la dimension des éléments les plus fins peut descendre en dessous de 0,1 μm (fillers, fumée de silice). De même les granulats très légers ont des masses volumiques inférieures à 100 kg/m^3 . La pâte (ciment + eau), élément actif du béton enrobe les granulats. L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains. La pâte joue à l'état frais le rôle de lubrifiant et de colle à l'état durci.

Tableau I.1 : *Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant.*

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (en %)	14-22	1-6	7-14	60-78
Poids (en %)	5-9		9-18	65-85

La confection d'un béton approprié à sa destination consiste, à partir d'études graphiques ou expérimentales, à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants. [5]

I.1.4. Les constituants du béton :

I.1.4.1. Granulats :

Un granulats est un matériau utilisé en construction qui est composé de granits de différentes dimensions. Il peut être naturel, artificiel, ou recyclé. Les granulats naturels ne doivent pas avoir subi de transformation autre que mécanique (ils peuvent donc être obtenus par traitement de matériaux inorganiques précédemment utilisés dans la construction).

On désigne les granulats de la manière indiquée dans le tableau I.1 en fonction de leur classe granulaire et de l'usage auquel ils sont destinés. La classe granulaire est définie sous la forme **d/D** à partir des dimensions inférieures (d) et supérieures (D) de tamis exprimées en mm. Lorsqu'on parle d'un gravillon 10/14, cela signifie que la plupart des grains qui composent ce gravillon passent au tamis de dimension D=14mm et sont arrêtés au tamis d=10mm. On admet qu'un petit pourcentage de grains passe au tamis de 10mm et que, de même, des grains soient retenus sur le tamis 14 mm. Les normes européennes et la norme expérimentale française **NF XP18-545** indiquent les exigences pour ces pourcentages. Lorsque la dimension la plus faible du granulats est inférieure à 1mm, on la note conventionnellement d=0. Dans tous les cas $D/d \geq 1,4$.

Les normes référencées **NF** ont le statut de normes françaises ; les normes référencées **EN**, comme celles indiquées dans le tableau ci-après, ont le statut de norme française et européenne. Lorsque deux normes **NF** et **EN** traitent d'un même sujet, la norme européenne et ne peut qu'y rajouter des prescriptions complémentaires.

Tableau I.2 : Désignation des granulats (XP18-545).

	Béton et mortier EN 12620 EN 13139	Mélanges Bitumineux EN 13034	Construction de chaussées EN 13242
Sable 0/D	d = 0 D ≤ 4mm	d = 0 D ≤ 2mm	d = 0 D ≤ 6.3mm
Gravillons d/D	d ≥ 2mm 4mm ≤ D ≤ 63mm	d ≥ 2mm 2mm ≤ D ≤ 45mm	d ≥ 1mm 2mm ≤ D ≤ 90mm
Graves 0/D	d = 0 4mm ≤ D ≤ 45mm	d = 0 2mm ≤ D ≤ 45mm	d = 0 6.3mm ≤ D ≤ 90mm

Il existe d'autres dénominations que celles indiquées dans le tableau I.2.

- Les fillers : sont des granulats dont au moins 70% des grains passe au tamis de 0.063mm.
- Les fines d'un granulat : sont la fraction granulaire qui passe au tamis de 0.063mm.

On utilise le terme de sablons pour des sables très fins ($D \leq 1\text{mm}$).

Certaines propriétés des granulats sont directement liées aux caractéristiques intrinsèques des roches originelles ; c'est le cas de la masse volumique réelle, de l'absorption d'eau, mais aussi de la résistance mécanique qui peut s'exprimer par la résistance à la fragmentation, à l'usure ou au polissage.

D'autres caractéristiques dérivent du mode d'élaboration des granulats, que ce soit après extraction alluvionnaire ou par concassage de roches massives en carrières. Il s'agit principalement des paramètres liés à la distribution dimensionnelle des grains ou granularité. Ces caractéristiques sont complétées par celles liées à la propreté des matériaux obtenues en évaluant le pourcentage des fines ainsi que leur degré de pollution par les minéraux argileux qui sont néfastes à la fabrication de bétons de qualités. A ces paramètres s'ajoutent des caractéristiques liées à l'angularité et à la forme des grains ainsi qu'à leur sensibilité au gel, leur porosité et leur réactivité chimique.

Il en résulte une dispersion sur les caractéristiques finales du matériau élaboré, ce qui oblige les producteurs à une grande rigueur dans la spécification des produits. Les normes citées énoncent ces spécifications et permettent à l'utilisateur de choisir les granulats en fonction de l'usage prévu. Le tableau I.3 résume les caractéristiques recherchées pour les granulats. Dans le cas d'un usage routier ou pour la réalisation des bétons. [6]

Tableau I.3: Les caractéristiques recherchées pour les granulats.

	Granulats pour usages routiers	Granulats pour béton
Mise en œuvre	Comportement à court terme : <ul style="list-style-type: none"> - Granulométrie. - Angularité. - Propriété. - Teneur en eau. - Masse volumique. - Coefficient d'absorption. 	Comportement à la mise en œuvre : <ul style="list-style-type: none"> - Granulométrie. - Angularité. - Propriété. - Teneur en eau. - Masse volumique. - Coefficient d'absorption.
Niveau de service	Evolution à long terme et niveau d'usage : <ul style="list-style-type: none"> - Résistance mécanique : A la fragmentation ; A l'usure ; Au polissage. - Affinité aux liants. - Gélivité. - Angularité. 	Résistances mécaniques et durabilité : <ul style="list-style-type: none"> - Résistance mécanique. - Affinité aux liants. - Gélivité. - Teneur en chlorure en sulfates. - Alkali réactivité.

D'après la norme **XP P 18-540**, les caractéristiques essentielles des granulats destinés aux bétons hydrauliques sont les suivantes :

I.1.4.1.1. Le gravier :

Le gravier est un ensemble de petits cailloux que l'on trouve dans les roches sédimentaires détritiques (constituées de débris) meubles.

Le gravier appartient à la classe dite des « rudites » ; dans le système de classification des sédiments, il se place après la classe des lutites (limon) et des arénites (sable).

Pour être qualifié de gravier, le diamètre des éléments doit être compris entre 2 et 20 mm selon l'échelle granulométrique universelle.

Dans la classe des rudites comprend les graviers (de 2 à 20 mm), les cailloux (anguleux) et galets (arrondis) (de 20 à 200 mm de diamètre), et les blocs (au-delà de 200 mm de diamètre).

Le gravier est utilisé par les industriels comme les particuliers, à des fins pratiques ou décoratives :

- mélangé à du sable à maçonner, il sert à fabriquer du béton ;
- associé à de l'asphalte, il forme un revêtement multicouche fin, peu coûteux et peu exigeant en entretien qui couvre et protège un toit plat (ou à faible pente) ;
- dispersé sur une allée carrossable, il délimite les zones et donne du style à une habitation, une résidence, un parc ;
- étalé sur le sol en guise de jardin (on parle de « jardin sur gravier »), il embellit l'espace et assure un meilleur drainage du sol. Idem pour une terrasse ou une cour...

Le choix du gravier pour une allée ou une terrasse dépend d'au moins deux critères interdépendants :

- l'utilisation, car le gravier disposé autour d'un arbre ne sera pas le même que celui qui compose une descente de garage ;
- la granulométrie, autrement dit la taille, voire la forme du gravier (faible diamètre pour de la décoration contre diamètre plus élevé pour une allée).

I.1.4.1.2. Le sable :

On appelle sables, les matériaux granulaires inertes conformes à la **NBN B 11-011**.

➤ Les sables naturels:

Les sables naturels résultent :

- soit de la désagrégation naturelle de roches généralement siliceuses : ce sont les sables ronds ;
- soit du concassage de roches ou de gravier : ce sont les sables de concassage ;
- soit du mélange de sables ronds et de concassage : ce sont les sables mixtes.

➤ Les sables artificiels :

Les sables artificiels sont des sables provenant du recyclage de résidus industriels ou de matériaux de construction.

La matière d'agrégation est un sable.

En cas de mélange de plusieurs sables, le mélange composé répond aux exigences minimales du présent cahier des charges type.

I.1.4.2. L'eau de gâchage :

Elle est conforme aux prescriptions de la **NBN EN 206-1**.

Le "gâchage" est l'opération irréversible d'ajout de l'eau au ciment. Cette opération se poursuit par le malaxage. L'eau de gâchage est la quantité totale d'eau que l'on utilise pour faire le béton.

Les eaux naturelles conviennent comme eaux de gâchage, à moins qu'elles ne contiennent des substances qui gênent le durcissement comme certaines eaux usées ou des eaux marécageuses. En cas de doute, une analyse chimique s'impose.

La résistance finale d'un béton dépend du rapport **E/C** (masse d'eau / masse de ciment) du mélange.

Le rapport **E/C** d'un béton courant varie entre 0.4 (qualité supérieure) et 0.6 (béton de fondation).

En général toutes les eaux conviennent si elles ne contiennent pas d'éléments nocifs qui influenceraient défavorablement le durcissement (matières organiques telles que huiles, graisses, sucres...) ou la corrosion des armatures (acides humiques, eaux de mer...).

L'eau potable du réseau de distribution convient très bien mais l'eau puisée en eau courante ou dans la nappe phréatique peut en général convenir.

On évitera toujours l'approvisionnement en eaux stagnantes odoriférantes. [7]

I.1.4.3. Ciment :

I.1.4.3.1. présentation générale :

Les ciments usuels sont aussi appelés liants hydrauliques car ils ont la propriété de s'hydrater en présence d'eau et parce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble l'eau.

Dans le langage courant, le terme de ciment peut être source de confusion lorsqu'il est utilisé pour désigner à la fois :

- La poudre de ciment (par exemple telle qu'elle est commercialisée en sac) ;
- La pâte de ciment au moment de son gâchage avec l'eau ;
- Le produit obtenu après durcissement.

Dans tout ce qui suit, on distinguera ces différents états en appelant :

- Ciment anhydre, la poudre de ciment avant son gâchage avec l'eau ;
- Ciment hydraté, les composés, insolubles dans l'eau, obtenus par combinaison chimique de l'eau avec le grain de ciment anhydre ;
- Pâte fraîche de ciment, le mélange d'eau et de ciment anhydre avant que l'hydratation n'ait conduit à en faire un solide appelé pâte de ciment durcie.

I.1.4.3.2. Aspect historique :

L'utilisation et la fabrication du ciment remontent à l'antiquité. En effet, les Romains et les Grecs savaient fabriquer du ciment. Ils utilisaient la chaux (CaCO_3) mélangée avec le sable et des matériaux d'origine volcanique : c'est la réaction pouzzolanique. On appelle pouzzolanes, les minéraux qui rentrent dans cette réaction et qui sont composés dans leur grande partie de silice et d'alumine. Joseph Aspdin est considéré comme l'inventeur du ciment qu'on utilise aujourd'hui : il en a breveté l'appellation en 1824. On peut cependant noter que Smeaton, rapporte en 1756 [8], la synthèse d'un matériau proche du ciment à partir d'un calcaire argileux et de cendres volcaniques siliceuses. Il obtint un mortier aussi dur et du même aspect que la pierre de la presqu'île de Portland, au sud de l'Angleterre. L'appellation de Ciment Portland devait être conservée jusqu'à nos jours.

L'idée selon laquelle le béton est un matériau moderne et que la chaux et les liants

chaux-pouzzolane sont une invention des Grecs et des Romains est peut-être à réviser. En effet, la découverte sur un site néolithique, au sud de la Galilée, de dalles de béton contenant d'importantes quantités de chaux et ayant conservé une excellente qualité à travers le temps, laisse penser que les origines du béton remontent en fait à la période néolithique, et que l'utilisation de la chaux daterait peut-être d'une période encore plus éloignée. [9]

I.1.4.3.3. Principes et méthodes de fabrication :

➤ Fabrication par voie humide :

Cette voie est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui requiert le plus d'énergie.

Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont broyés finement et mélangés avec l'eau de façon à constituer une pâte assez liquide (28 à 42 % d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de huit à dix mètres de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herses.

La pâte est ensuite entreposée dans de grands bassins de volumes de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et homogénéisée. Ce mélange est appelé le cru. Des

analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

La pâte est ensuite acheminée à l'entrée d'un four rotatif, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure. Ce four rotatif légèrement incliné est constitué d'un cylindre d'acier dont la longueur peut atteindre deux cents mètres. On distingue à l'intérieur du four plusieurs zones, dont les trois principales sont :

- Zone de séchage.
- Zone de décarbonatation.
- Zone de clinkérisation.

Les parois de la partie supérieure du four (zone de séchage - environ 20 % de la longueur du four) sont garnies de chaînes marines afin d'augmenter les échanges caloriques entre la pâte et les parties chaudes du four.

Le clinker à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs (trempe du clinker), dont il existe plusieurs types comme les refroidisseurs à grille, ou à ballonnets. La vitesse de trempe a une influence sur les propriétés du clinker (phase vitreuse).

De toute façon, quelle que soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on obtient un même clinker qui est encore chaud, d'environ 600 à 1 200 °C. Il faut ensuite le broyer très finement et très régulièrement avec environ 5 % de gypse CaSO_4 afin de « régulariser » la prise.

Le broyage est une opération délicate et coûteuse, non seulement parce que le clinker est un matériau dur, mais aussi parce que même les meilleurs broyeurs ont des rendements énergétiques déplorables.

Les broyeurs à boulets sont de grands cylindres disposés presque horizontalement, remplis à moitié de boulets d'acier et que l'on fait tourner rapidement autour de leur axe (20 tr/min) ; le ciment y atteint une température élevée (160 °C), ce qui nécessite l'arrosage extérieur des broyeurs. On introduit le clinker avec un certain pourcentage de gypse dans la partie haute, puis on récupère la poudre dans la partie basse.

Lors du broyage à circuit ouvert, le clinker ne passe qu'une fois dans le broyeur. Lors du broyage en circuit fermé, le clinker passe rapidement dans le broyeur, puis à sa sortie, est trié dans un cyclone. Le broyage a pour but de réduire les grains du clinker en poudre, et de

permettre l'ajout du gypse (environ 5 %) pour réguler quelques propriétés du ciment Portland, comme son temps de prise et de durcissement.

À la sortie du broyeur, le ciment est à une température environ de 160 °C, et avant d'être transporté vers des silos de stockage, il doit passer au refroidisseur à force centrifuge pour que sa température soit maintenue à environ 65 °C.

➤ **Fabrication par voie sèche :**

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange d'environ de 80 % de calcaire (CaCO_3) et de 20 % d'argile ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$). Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis.

Après avoir été finement broyée, la poudre (farine) est transportée depuis le silo d'homogénéisation jusqu'au four, soit par pompe, aéroglisser puis par aérolift ou élévateur.

Les fours sont constitués de deux parties:

- la structure verticale fixe : la tour de préchauffage constituée de cyclones et d'échangeurs de chaleur ;
- le four ou tronçon rotatif.

Les gaz réchauffent la farine crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La farine en s'échauffant au-delà des 800 °C environ va se décarbonater (partiellement) en libérant du dioxyde de carbone (CO_2) et son eau. La farine chaude pénètre ensuite dans le tronçon rotatif analogue à celui utilisé dans la voie humide, mais beaucoup plus court.

La méthode de fabrication par voie sèche pose aux fabricants d'importants problèmes techniques:

La ségrégation possible entre argile et calcaire dans les préchauffeurs. En effet, le système utilisé semble être néfaste et, en fait, est utilisé ailleurs pour trier des particules. Dans le cas de la fabrication des ciments, il n'en est rien. La poudre reste homogène et ceci peut s'expliquer par le fait que l'argile et le calcaire ont la même masse volumique (2,70 g/cm³). De plus, le matériel a été conçu dans cet esprit et toutes les précautions ont été prises.

Le problème des poussières. Ce problème est rendu d'autant plus aigu, que les pouvoirs publics, très sensibilisés par les problèmes de nuisance, imposent des conditions draconiennes. Ceci oblige les fabricants à installer des dépoussiéreurs, ce qui augmente considérablement les investissements de la cimenterie.

Les dépoussiéreurs utilisés pour traiter les gaz du four sont :

- les électro filtres constitués de grilles de fils métalliques mis sous haute tension électrique et sur lesquels viennent se fixer des grains de poussière ionisée. Ces grains de poussière s'agglomèrent et, sous l'action de vibreurs ou de marteaux qui agitent les fils, retombent au fond du dépoussiéreur où ils sont récupérés et renvoyés dans le four. En dehors des pannes, ces appareils ont des rendements de l'ordre de 99 %, mais absorbent une part importante du capital d'équipement de la cimenterie.
- les filtres à manches.

Le problème de l'homogénéité du cru est délicat. Nous avons vu comment il pouvait être résolu au moyen d'une pré-homogénéisation puis d'une homogénéisation.

I.1.4.3.4. Les différents types de ciments :

Le ciment est un liant hydraulique : la réaction chimique entre la poudre de ciment et l'eau produit un minéral artificiel insoluble. Plus les grains de ciment sont fins, plus cette réaction (hydratation) s'opère rapidement. Le durcissement a lieu aussi bien à l'air que sous eau.

➤ Le ciment Portland (aussi appelé clinker Portland) :

Il s'agit d'un mélange, finement moulu de roche calcaire (craie) et de schiste (argile), homogénéisé, séché, décarbonaté puis fondu(1450°C) dans un four rotatif. Ensuite ce mélange est refroidi rapidement et enfin broyé. On obtient ainsi le clinker Portland.

Le clinker est finement broyé pour donner un ciment. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets, gros cylindres chargés de boulets d'acier et mis en rotation. Lors de cette étape, le gypse (3 à 5%), indispensable à la régulation de prise du ciment, est ajouté au clinker. On obtient alors le ciment. Les matières premières (calcaire, argile) sont obtenues à partir de carrières naturelles à ciel ouvert. Elles sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. C'est la raison pour laquelle les cimenteries sont situées près de carrières de calcaire ou de craie.

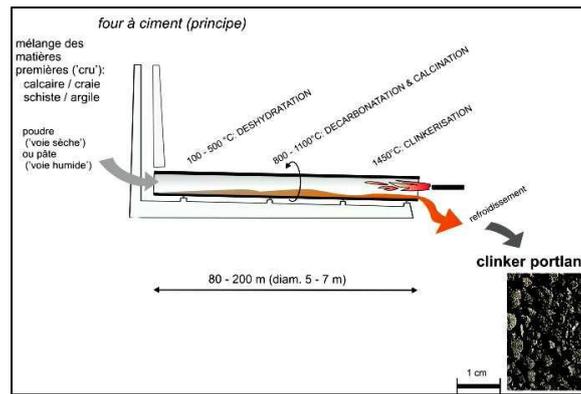


Figure I.1 : Broyage du clinker.

- **Fabrication du ciment Portland :**

La fabrication de ce ciment se distingue en six étapes principales :

- l'extraction
- l'homogénéisation
- le séchage et le broyage
- la cuisson
- le refroidissement
- le broyage

- a. **Extraction :**

L'extraction consiste à extraire les matières premières vierges (comme le calcaire « 75 à 80 % » et l'argile « 20 à 25 % ») à partir de carrières. Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. La roche est acheminée par des tombereaux, ou des bandes transporteuses vers un atelier de concassage. Les matières premières doivent être échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition chimique régulière dans le temps. La prise d'échantillons en continu permet de déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice).

- b. **Homogénéisation :**

La phase d'homogénéisation consiste à créer un mélange homogène aux proportions chimiques bien définies. Cette opération peut être réalisée : soit dans un hall de pré homogénéisation où on obtient le mélange homogène en disposant la matière en couches horizontales superposées, puis en la reprenant verticalement à l'aide d'une roue-pelle; soit dans un silo vertical par brassage par air comprimé.

c. Séchage et broyage :

Le séchage et le broyage sont l'étape visant à favoriser les réactions chimiques ultérieures. Les matières premières sont séchées et broyées très finement (de l'ordre du micron) dans des broyeurs à boulets, ou, plus récemment, dans des broyeurs verticaux à meules, plus économes en énergie.

On distingue trois types principaux de "voies" en fonction du type de préparation :

- la voie humide : c'est la technique la plus ancienne. Elle est aussi la plus gourmande en énergie, nécessaire à l'évaporation de l'excédent d'eau.

Dans les deux techniques suivantes, les matières premières sont parfaitement homogénéisées et séchées sous forme de « *cru* » ou « *farine* ».

- la voie sèche : la farine est introduite directement dans le four sous forme pulvérulente, après un préchauffage dans une tour à échangeurs thermiques.
- la voie semi-sèche : avant introduction dans le four, la farine est transformée en "granules" par humidification dans de grandes « assiettes » rotatives inclinées.

Le cru est ensuite introduit dans un long four (60 m à 200 m) rotatif (1,5 à 3 tours par minute), tubulaire (jusqu'à 6 m de diamètre), légèrement incliné (2 à 3 % d'inclinaison)

Le cru est ensuite introduit dans un long four (60 m à 200 m) rotatif (1,5 à 3 tours par minute), tubulaire (jusqu'à 6 m de diamètre), légèrement incliné (2 à 3 % d'inclinaison).

d. Cuisson :

Le cru va suivre différentes étapes de transformation lors de sa lente progression dans le four, vers la partie basse, à la rencontre de la flamme. Cette source de chaleur est alimentée au charbon broyé, fioul lourd, gaz, ou encore en partie avec des combustibles de substitution provenant d'autres industries, tels que le coke de pétrole, les pneus usagés, les **RBA**, les farines animales, les huiles usagées, ou de centres de recyclage tels que les **DSB** ou les **DIB**.

La température nécessaire à la clinkérisation est de l'ordre de 1 450 °C. L'énergie consommée se situe entre 3 200 et 4 200 MJ par tonne de clinker, qui est le produit semi-fini obtenu à la fin du cycle de cuisson. Il se présente sous forme de granules grises.

À la sortie du four, le clinker doit être refroidi et broyé avant d'être entreposé dans des silos.

Le clinker est le résultat d'un ensemble de réactions physico-chimiques progressives (clinkérisation) permettant :

- La décarbonatation du carbonate de calcium (donnant la chaux vive) ;
- La scission de l'argile en silice et alumine ;
- La combinaison de la silice et de l'alumine avec la chaux pour former des silicates et des aluminates de calcium.

e. Refroidissement :

Dans le cas des ciments gris, le clinker est refroidi, dans la plupart des cimenteries actuelles, par un refroidisseur à grilles:

- le clinker va progresser à l'intérieur du refroidisseur grâce aux à-coups répétés des grilles sur lesquelles il repose,
- au travers des grilles, de puissants ventilateurs vont souffler sous le clinker afin de le refroidir,
- à l'entrée ou à la sortie du refroidisseur, selon le modèle utilisé, un concasseur à un ou plusieurs rouleaux va le broyer de manière grossière.

Dans le cas du ciment blanc, plus fragile que le gris car il doit rester immaculé, un refroidisseur rotatif est inséré entre le four rotatif et le refroidisseur à grilles. Il s'agit d'un cylindre légèrement incliné qui tourne sur lui-même et à l'intérieur duquel de l'eau est pulvérisée à l'aide de multiples buses. Bien que sa composition chimique soit légèrement différente, c'est grâce au refroidisseur rotatif que le ciment peut rester blanc : en effet, son rôle est de refroidir très rapidement le clinker à sa sortie du four, avant qu'il ne soit oxydé au contact de l'air. De plus, la taille des refroidisseurs à grilles utilisés sur les lignes de ciment blanc est considérablement réduite, le refroidisseur rotatif accomplissant une partie de leur travail.

f. Broyage :

Le clinker est ensuite finement broyé pour conférer au ciment des propriétés hydrauliques actives. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets, dispositifs cylindriques chargés de boulets d'acier et mis en rotation.

Lors de cette étape, le gypse (3 à 5 %), indispensable à la régulation de prise du ciment, est ajouté au clinker. On obtient alors le ciment Portland.

Les ciments à ajouts sont obtenus par l'addition, lors de la phase de broyage, d'éléments minéraux supplémentaires contenus dans des matériaux tels que :

- le laitier de hauts fourneaux (résidus de la sidérurgie) ;

- les cendres volantes de centrales électriques ;
- les fillers calcaires (granulats) ;
- les pouzzolanes naturelles ou artificielles.

❖ Broyage très fin

L'EMC est un ciment produit selon un procédé breveté de broyage intense de ciment CPA avec des différentes charges, comme sable fin, quartzite, pouzzolane ou cendres volantes, etc. Il possède les mêmes caractéristiques physiques que les ciments portland artificiels CPA, mais avec 50% moins de ciment, énergie et émissions de CO₂. [10]

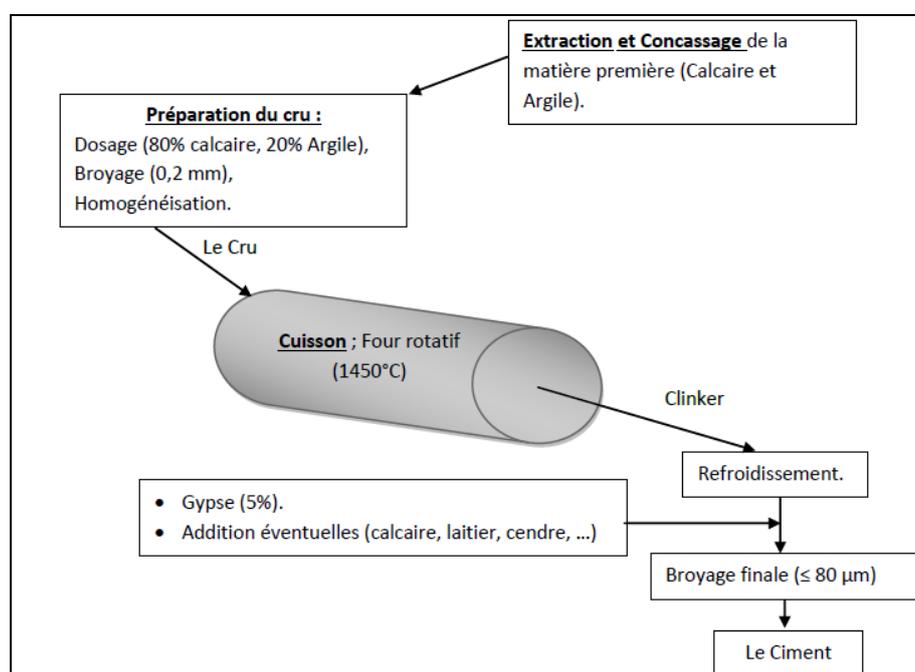


Figure I.2 : Schéma de fabrication du ciment portland. [11]

➤ Autres types du ciment :

Au clinker Portland peuvent être ajoutés un ou plusieurs des ingrédients suivants :

- Laitier du haut fourneau : produit granulé qui est obtenu par le refroidissement brusque de la gangue en fusion des hauts fourneaux. Constituant à hydraulicité latente, c.-à-d. que l'hydratation doit être activée.

Le rôle de démarreur est joué par le clinker Portland.

- Cendre volante : réagit avec la chaux libérée par l'hydratation du clinker.
- Calcaire : constituant inerte. Intervient physiquement comme plastifiant dans le béton frais.

Les ciments incorporent les composants suivants en diverses proportions : clinker et laitier de haut fourneau, éventuellement cendres volantes siliceuses et Calcaire.

Suivant la proportion de chacun de ces éléments on peut les classer de manière standardisée. La désignation des ciments est en effet normalisée [archive]. La norme de référence des ciments courants est la norme européenne **EN 197-1** publiée par l'**AFNOR** sous la référence **NF EN 197-1**. Les ciments peuvent être classés en cinq grandes familles et vingt-sept variantes principales :

- **CEM I :**

Le ciment **CEM I** également appelé ciment Portland, contient au minimum 95 % de clinker et au maximum 5 % de constituants secondaires.

- **CEM II :**

Les ciments **CEM II** (A ou B), contiennent au minimum 65 % de clinker et au maximum 35 % d'autres constituants comme le laitier de haut-fourneau, « la fumée de silice » (limitée à 10 %), la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les calcaires, etc. Les ciments **CEM II** sont bien adaptés pour les travaux massifs.

- **CEM II/A :**

Les ciments **CEM II A** sont composés de 80 à 94 % de clinker, à l'exception du Ciment Portland à la fumée de silice (**CEM II A-D**) qui en contient entre 90 et 94 %. La quasi-totalité des **CEM II A** sont composés de 6 à 20 % d'autres constituants, seul le **CEM II A-D** en compte 6 à 10 %.

- **CEM II/B :**

Les ciments **CEM II B** sont composés de 65 à 79 % de clinker. Ils contiennent entre 21 et 35 % d'autres constituants.

- **CEM III :**

Les **CEM III** (A, B ou C) également appelé Ciment de Haut-Fourneau, sont principalement obtenus grâce au mélange de 5 à 64 % de clinker avec 36 à 95 % de laitier de haut-fourneau.

- **CEM III/A :**

Le **CEM III A** contient entre 35 et 64 % de clinker et au minimum 36 % de laitier.

- **CEM III/B :**

Le **CEM III B** contient entre 20 et 34 % de clinker et au minimum 66 % de laitier.

- **CEM III/C :**

Le **CEM III C** contient entre 5 et 19 % de clinker et au minimum 81 % de laitier.

- **CEM IV :**

Les **CEM IV** sont des ciments de type pouzzolanique. Ils sont constitués de 45 à 89 % de clinker et de 11 à 55 % d'autres constituants comme le laitier de haut-fourneau, « la fumée de silice », le schiste calciné, la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les calcaires, etc.

- **CEM IV/A :**

Le **CEM IV/A** est composé de 65 à 89 % de clinker et de 11 à 35 % d'autres constituants.

- **CEM IV/B :**

Le **CEM IV/B** est composé de 45 à 64 % de clinker et de 36 à 55 % d'autres constituants.

- **Les CEM V :**

Les **CEM V** sont des ciments qui contiennent entre 20 et 64 % de clinker, 18 à 50 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 50 % de cendres volantes siliceuse et/ou de pouzzolanes. Ces ciments sont bien adaptés aux travaux hydrauliques, souterrains, fondations et injections par exemple.

- **CEM V/A :**

Le **CEM V/A** est composé de 40 à 64 % de clinker, 18 à 30 % de laitier et 16 à 30 % de cendres volantes siliceuse et/ou de pouzzolanes.

- **CEM V/B :**

Le **CEM V/B** est composé de 20 à 38 % de clinker, 31 à 50 % de laitier et 31 à 50 % de cendres volantes siliceuse et/ou de pouzzolanes. [12]

I.1.4.3.5. Les classes de résistance de ciments :

Les ciments sont répartis en trois classes, **32,5 ; 42,5 ; 52,5**, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours. La résistance normale d'un ciment est la résistance

mécanique à la compression mesurée a 28 jours conformément a la norme **NF EN 196-1** et exprimée en **N/mm²** (1 N/mm² = 1 MPa = 10 daN/cm² = 10 bars).

Tableau I.4 : Les classes de résistance de ciments. [13]

Désignation de la classe de résistance	Résistance à la compression (en MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante à 28 jours	
	à 2 jours	à 7 jours		
32,5 N	–	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10	–		
42,5 N	≥ 10	–	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20	–		
52,5 N	≥ 20	–	≥ 52,5	–
52,5 R	≥ 30	–		

I.1.4.3.6. Domaine d'emploi :

➤ Ciments courants :

• CEM I :

- Béton armé en général coule sur place ou préfabriqué.
- Béton précontraint.
- Décoffrage rapide, mise en service rapide (de préférence classe R).
- Bétonnage jusqu'à température extérieure entre 5 et 10 °C.
- Béton étuve ou auto-étuve.

• CEM II / A ou B :

Ces ciments sont les plus couramment utilisés :

- Béton en élévation, armé ou non, d'ouvrages courants.

- **CEM II / A ou B classe R :**

Travaux nécessitant une résistance initiale élevée (décoffrage rapide par exemple) :

- Fondations ou travaux souterrains en milieux non agressifs.
- Dallages, sols industriels.
- Maçonneries.
- Stabilisation des sols.

- **CEM III / A, B ou C :**

- **CEM V / A ou B :**

- Travaux souterrains en milieux agressifs (terrains gypseux, eaux d'égouts, eaux industrielles, etc.).
- Ouvrages en milieux sulfatés: les ciments produits sont tous **ES**, ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates, en conformité à la norme **NF P 15-319**.
- Travaux à la mer : ciments pour travaux à la mer, en conformité à la norme **NF P 15-317**.
- Bétons de masse.
- Travaux en béton armé ou non, hydrauliques et souterrains (fondations).
- Travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation.
- Stabilisation des sols.

➤ **Autres ciments à usage spécifiques :**

- **Le ciment alumineux fondu :**

- Ouvrages exigeant une résistance élevée à court terme.
- Bétonnage par temps froid (jusqu'à - 10 °C pour des bétons massifs).
- Pour béton devant subir des chocs thermiques ou une forte abrasion (utilisation de granulats synthétiques alumino-calciques).
- Pour béton devant résister à des températures jusqu'à 1 250 °C.
- Travaux à la mer.
- Travaux en milieu fortement agressif (**PH** de 4 à 5,5).

• Travaux en milieu très fortement agressif (**PH** < 4) – milieu industriel et égouts urbains et ouvrages d'assainissement.

• **Le ciment prompt naturel :**

• Ouvrages nécessitant une prise très rapide : scellements courants, blocages, aveuglements, voies d'eau, calfatages.

• Enduits, moulages, tableaux, arêtes, repères, charges importantes.

• Réhabilitation de façades de toutes compositions en mélange avec les chaux **HL** ou **NHL**.

• Petits ouvrages : chainages, regards, appuis.

• Milieux agressifs (eaux pures, eau de mer).

• Travaux à la mer : ciment pour travaux à la mer, en conformité à la norme **NF P 15-317**. [13]

I.1.4.3.7. Les ciments courants en Algérie :

- Type 1 : **CEM I** Ciment Portland ;
- Type 2 : **CEM II** Ciment Portland composé ;
- Type 3 : **CEM III** Ciment de haut fourneau ;
- Type 4 : **CEM IV** Ciment pouzzolanique ;
- Type 5 : **CEM V** Ciment composé.

Le choix d'un ciment se fait suivant les critères suivants :

- Prestations élevées à court terme ex.: **CEM I 52.5R*** ou **CEM III/A 52.5R***
- Température de bétonnage
- Temps froid : **CEM I 52.5** ou **CEM I 42.5**
- Temps chaud : **CEM III/C 32.5**
- Présence de sulfates
- Prévention réaction alcali-silice... [14]

I.1.4.3.8. Principaux pays producteurs du ciment en 2013 :

Tableau I.5 : *Principaux pays producteurs du ciment en 2013*. [10]

	Pays	Production	% monde
1	Chine	2416.0	59.4
2	Inde	280.0	6.9
3	USA	77.41	1.9
4	Iran	72.0	1.8
5	Turquie	71.34	1.8
6	Brésil	69.98	1.7
7	Russie	66.4	1.6
8	Viêt-Nam	58.0	1.4
9	Japon	57.4	1.4
10	Arabie Saoudite	57.0	1.4
11	Indonésie	56.0	1.4
12	Egypte	50.0	1.2
13	Corée du sud	47.29	1.1
14	Thaïlande	42.0	1
15	Mexique	34.6	0.9
16	Allemagne	31.31	0.8
17	Pakistan	31.0	0.8
18	Italie	22.0	0.5
19	Malaisie	21.46	0.5
20	Emirats arabes Unis	21.0	0.5
	Total monde	4070	100%

I.1.5. Rôle des différents constituants du béton :

I.1.5.1. Les granulats :

Ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va coller les granulats.

I.1.5.2. Le sable :

Il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.

I.1.5.3. L'eau :

C'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.

I.1.5.4 : Ciment :

C'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients.

I.1.5.5 : Les plastifiants :

Ils augmentent l'ouvrabilité du béton (facilité avec laquelle on peut travailler le béton). [15]

I.1.6. Fabrication du béton :

La fabrication du béton est un processus spécifique : en fonction de la nature et la quantité de chacun des composants (ciment, granulats, eau, adjuvants), il présentera des caractéristiques différentes. Une fois fabriqué, le béton prêt à l'emploi est un produit frais, qui doit être transporté et utilisé rapidement sur des marchés locaux, et dans des conditions optimales. [2]

I.1.6.1. L'installation de fabrication :

Le béton est équipé de dispositifs permettant de doser le liant, respectivement le granulat et l'eau avec une précision de 3%.

I.1.6.2. Le temps de malaxage :

Ça dépend du type d'appareils de fabrication mécanique. Il doit toujours être suffisant pour assurer une homogénéité complète du béton. Il est en principe de 20 tours au minimum pour les bétonnières à axe horizontal et de 10 tours au minimum pour les malaxeurs à contre-courant.

I.1.6.3. Le malaxage :

C'est à surveiller par un opérateur expérimenté qui est capable de respecter le degré de consistance demandée et de maintenir le rapport E/C imposé pour le béton de la catégorie de fabrication. [16]

I.1.7. Les caractéristiques physiques et mécaniques :

I.1.7.1. Caractéristiques physiques :

Ce sont essentiellement les propriétés du béton frais, on cite :

➤ **L'ouvrabilité :**

C'est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage.

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façon et en particulier par des mesures de plasticité. Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. Nous n'en citerons que quelques-uns, les plus couramment utilisés dans la pratique :

- Essai au cône d'Abrams.
- Essai à la boîte en L.
- Essai avec le maniabilimètre.

➤ **La porosité :**

La porosité est le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage. Elle influe sur l'aptitude de résister aux sollicitations mécaniques (compression statique, usure, abrasion...etc.), chimiques (attaque en ions solvants) et surtout à la tenue au gel-dégel ; c'est pour ça que la porosité est un critère important et sert à améliorer les performances des bétons notamment leur durabilité.

➤ **La masse volumique :**

On appelle masse volumique d'un corps, la masse de l'unité de volume de ce corps. On distingue :

- Masse volumique apparente : c'est la masse du matériau par unité de volume, exprimée en t/m^3 , en kg/dm^3 , ou en g/cm^3 . Cette masse volumique intègre les grains de l'agrégat ainsi que les vides compris entre ces grains.

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

- Masse volumique absolue : c'est la masse du matériau par unité de volume, exprimée en t/m^3 , en kg/dm^3 , ou en g/cm^3 . Cette masse volumique n'intègre que les grains de l'agrégat, donc sans les vides compris entre ces grains. La masse volumique absolue a la même valeur que la densité d'un même matériau, la seule différence étant que la densité n'a pas d'unité.
- Masse volumique réelle : masse de l'unité de volume absolue de corps, c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps sans tenir compte du volume des vides inters granulaires.

I.1.7.2. Caractéristiques mécaniques :

Ce sont essentiellement les propriétés du béton durci, on cite celles qui sont prise en compte par l'ingénieur de génie civil :

➤ Les résistances mesurées par des essais destructifs :

- Résistance à la compression : un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours.
- Résistance à la traction : la résistance à la traction est environ égale au 1/10 de la résistance à la compression. [15]
- Résistance à la flexion : Contrainte maximale de fibre d'une éprouvette immédiatement avant fendillement ou rupture dans un essai de flexion. Pour les matériaux qui ne se fendillent pas en essai de flexion, le résultat est exprimé par la limite d'élasticité en flexion au lieu de la résistance à la flexion. Autre terme : « module de rupture ».

➤ Les résistances mesurées par des essais non destructifs :

- Résistance à l'ultrason : résistance mesurée par l'ultrason, qui est un essai non destructif, il est destiné surtout pour tester l'homogénéité du béton car les résultats dépendent de la formulation de béton de la densité, de la porosité, de l'humidité... et généralement on combine les vitesses ultrasoniques avec un autre essai destructif "carottage".

- Résistance au scléromètre : La mesure de la dureté de surface d'un béton est basée sur l'étude du rebond d'une bille d'acier projetée sur sa surface à l'aide d'un ressort taré. La hauteur du rebond qui augmente avec la dureté de surface du béton sollicité, est caractérisée par un indice sclérométrique.

I.1.8. Domaine d'emploi :

Le béton fait partie de notre cadre de vie. Les performances et souplesse d'emploi permettent au béton d'être présent dans tous les domaines du bâtiment et des travaux publics.

I.1.8.1. Le bâtiment :

Le béton a sa place dans les bâtiments d'habitation (logements), écoles, hôpitaux... aussi bien que dans les constructions liées à l'activité professionnelle (usines, ateliers, commerces, bureaux) ou dans des réalisations diverses (socioculturelles, sportives ou de loisir...). Ses qualités lui permettent de répondre aux exigences des différentes parties de la construction :

- structure ;
- enveloppe ;
- plancher ;
- couverture.

I.1.8.2. Les travaux publics :**➤ Les ponts**

Les progrès techniques et, en particulier, l'évolution des caractéristiques du béton, permettent de réaliser des portées atteignant 800 m pour les ponts haubanes.

➤ Les tunnels

Pour les tunnels, le béton est soit coulé en place, soit utilisé sous forme de voussoirs préfabriqués. Ceux-ci sont posés à l'avancement de la machine à forer – le tunnelier – et permettent de “chemiser” la galerie.

➤ Les barrages

Les grands barrages sont le plus souvent en béton permettant des implantations dans les sites les plus difficiles.

➤ Les routes

La chaussée béton prend une part de plus en plus importante dans les grandes voiries routières et autoroutières, grâce au développement de techniques modernes : béton armé continu, dalle

épaisse, traitement de surface, ainsi que dans les pistes de chars et d'aérodromes. Les voiries à faible trafic montrent un regain d'intérêt pour les solutions béton, qui leur assurent durabilité et faible coût d'entretien.

➤ **Autres ouvrages :**

Il faut également citer les ouvrages hors du commun : structures offshore ou centrales nucléaires, dont les exigences requièrent des bétons aux caractéristiques mécaniques et à la durabilité élevées. [13]

I.1.9. Avantages et inconvénients du béton :

I.1.9.1. Avantages du béton:

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien.
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer.
- Il devient solide comme de la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles.
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint).
- Il convient aux constructions monolithiques. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas de béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité.
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées.
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication.

I.1.9.2. Inconvénients du béton :

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toutes façons, il reste les quelques inconvénients suivants:

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de béton légers d'isolation)
- Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux)
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage.

I.2. Généralités sur le béton adjuvanté :

I.2.1. Aspect historique :

D'après certaines recherches, l'existence des adjuvants date de l'époque romaine. Les adjuvants à cette époque auraient été du jaune d'œuf ou du sang ajoutés aux bétons de chaux et de pouzzolanes.

Entre les années 1875 et 1890, on ajoute au ciment portland du gypse ou du chlorure de calcium pour régulariser la prise.

En 1888, CANDLOT montra que l'addition du chlorure de calcium (CaCl_2) permettait

D'accélérer ou retarder la prise du ciment.

A côté des accélérateurs, des hydrofuges pour l'étanchéité des réservoirs ont été utilisés.

L'ajout de la chaux grasse pour améliorer la plasticité et en 1906 aux **USA** pour la construction de réservoirs [CANDLOT, 1895].

C'est également au début du siècle qu'on essaya du silicate de soude pour améliorer

L'imperméabilité.

En 1909 le sucre a été utilisé comme retardateur de prise.

La commercialisation d'adjuvants permettant d'améliorer certaines qualités du béton débuta en 1910 (hydrofuges, accélérateurs de prise).

Les plastifiants furent commercialisés en 1935.

Les entraîneurs d'air apparaissent en 1939 à l'**USA** puis en 1947 en Europe.

C'est après 1960 que les adjuvants se sont développés et que des recherches sont effectuées un peu partout dans le monde, plus particulièrement au Japon depuis 1970.

I.2.2. Définition :

On appelle béton adjuvanté, tout ingrédient autre que le ciment, les granulats et l'eau, que l'on ajoute au mélange. Les adjuvants du béton sont des produits chimiques solubles dans l'eau qui modifient principalement :

- les solubilités.
- les vitesses de dissolution.
- l'hydratation des divers constituants d'un liant hydraulique. [17]

I.2.3. Les différents adjuvants :

I.2.3.1. Les superplastifiants [NF EN 934-2]:

Un superplastifiant est un adjuvant qui, sans modifier la consistance, permet de réduire fortement la teneur en eau d'un béton donné, ou qui, sans en modifier la teneur en eau, en augmente considérablement l'affaissement, l'étalement.

A noter qu'il peut produire les deux effets à la fois.

Un superplastifiant est un adjuvant, qui introduit dans un béton, un mortier ou coulis, pour fonction principale de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange.

Ce sont en général des produits de synthèse organique. Les plus utilisés sont les dérivés de mélamines ou de naphthalène. Ils peuvent être aussi fabriqués à partir de sous-produits de l'industrie du bois purifiés et traités (lignosulfonates). Sur le béton frais, on constate une augmentation considérable de l'ouvrabilité pour une même teneur en eau. Ces effets ont une durée en fonction de la température, de la teneur en eau et du dosage en ciment. Il n'y a ni ségrégation, ni ressuage si des précautions sont prises à la mise en œuvre, la cohésion du béton reste très bonne.

Les superplastifiants sont particulièrement utiles pour la réalisation des fondations, dallages, radiers, sols industriels, etc., et pratiquement indispensables pour la confection des bétons de hautes performances. Ils sont couramment utilisés dans le béton prêt à l'emploi, surtout lorsqu'il est pompé. En 1998, de nouvelles molécules issues de l'industrie chimique, les polyacrylates et les polycarboxylates, ont considérablement amélioré les performances des superplastifiants. Ces adjuvants dits de « nouvelle génération » ont permis notamment le développement des **BHP** et des bétons autoplaçants.

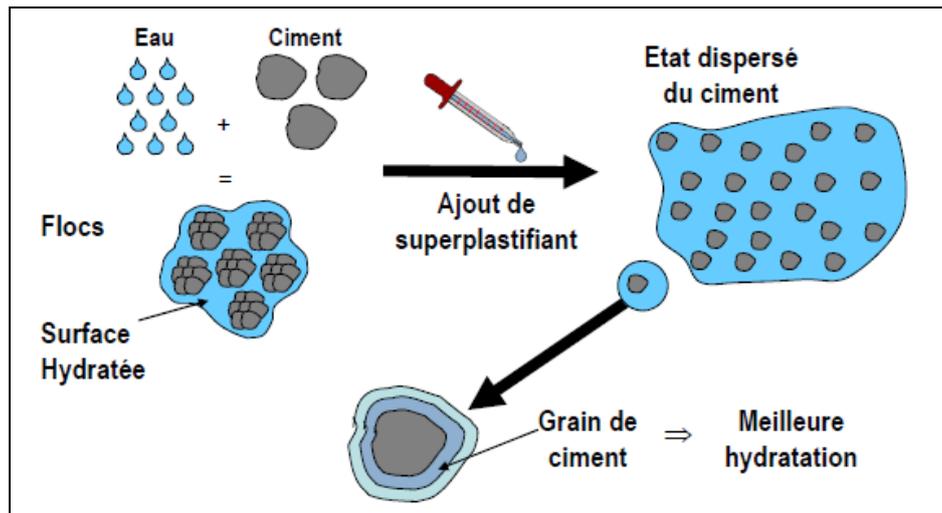


Figure I.3 : Le mécanisme de réaction de superplastifiant avec le ciment.

I.2.3.2. Les accélérateurs :

On distingue 2 sortes d'accélérateurs :

➤ Les accélérateurs de prise :

C'est un adjuvant dont la fonction principale est d'accélérer le début et la fin de prise du ciment. Mais en contrepartie, l'accélération recherchée peut entraîner une résistance mécanique moins élevée que le témoin.

• Effets secondaires possibles :

Les accélérateurs de prise et de durcissement augmentent les résistances aux jeunes âges mais on observe le plus souvent une légère diminution des résistances à 28j.

➤ Les accélérateurs de durcissement :

Ces adjuvants ont la fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiale du béton dans certains cas, ces résistances mécaniques peuvent être ultérieurement moins élevées que le témoin (exemple : le silicate de soude pour les bétons projetés).

L'utilisation d'un superplastifiant, haut réducteur d'eau permet d'obtenir des temps de prise plus rapides et un durcissement accéléré.

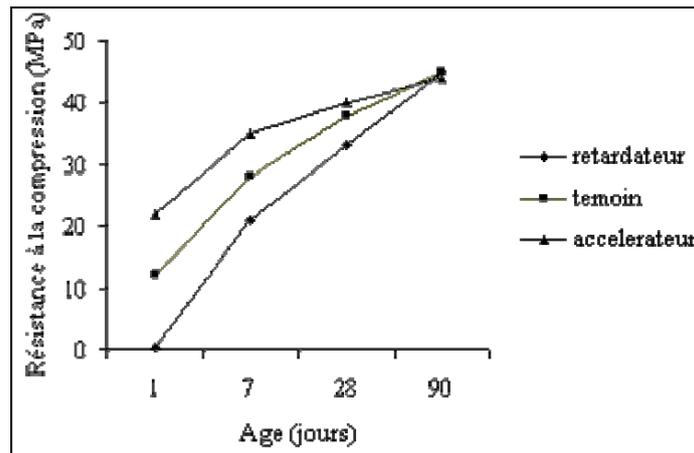


Figure I.4 : Schéma de l'influence d'un accélérateur comparé à un retardateur sur l'évolution des résistances.

I.2.3.3. Les retardateurs de prises [NF EN 934-2]:

Introduits dans l'eau de gâchage, ils ont pour fonction principale d'augmenter le temps de début de prise et le temps de fin de prise du ciment dans le béton, le mortier ou le coulis. Ils sont à base de lignosulfonates, d'hydrates de carbone ou d'oxydes de zinc ou de plomb.

En général, les retardateurs freinent la diffusion de la chaux libérée par l'hydratation du ciment et retardent de ce fait la cristallisation. Par rapport au témoin, l'augmentation du temps de début de prise est comprise entre une heure et deux heures. Au-delà de vingt-huit jours et souvent même dans un délai plus court, les résistances mécaniques sont en général augmentées par rapport au témoin. Les retardateurs de prise sont particulièrement recommandés pour les bétonnages par temps chaud et les bétonnages en grande masse. Ils permettent aussi de faciliter les reprises de bétonnage.

I.2.3.4. Les hydrofuges :

Ce sont des produits qui améliorent l'étanchéité des bétons et protègent de l'humidité, en arrêtant l'absorption capillaire.

On distingue deux sortes d'hydrofuges :

➤ Les hydrofuges de masse :

Ces produits peuvent se présenter sous forme de liquide ou poudre.

Ils sont introduits directement dans la bétonnière (pendant le malaxage) ou diluer dans l'eau de gâchage, s'il s'agit d'une poudre.

Ils sont constitués de particules très fines qui se gonflant viennent combler les pores se trouvant dans le béton.

Ces produits ne sont efficaces que si le béton, est bien compact et homogène.

Les hydrofuges ne doivent pas s'employer systématiquement dans la masse du béton mais plutôt dans les enduits de revêtement.

➤ **Les hydrofuges de surface :**

Ces hydrofuges s'appliquent sur le béton durci directement : à la brosse, pinceau ou aussi pulvérisés.

Ils sont constitués à base de résine acrylique, vinylique ou silicone. Certains produits sont aussi à base de bitume.

I.2.3.5. Les entraîneurs d'air :

• **Définition et utilisation :**

Ils permettent la formation, au cours du malaxage, d'un réseau uniforme de petites bulles d'air qui subsiste dans le béton durci. Ce réseau de bulle permet au béton de résister au cycle de gel/dégel.

Ils réagissent chimiquement avec les grains de ciment dans certains cas, formation de complexes peu solubles autour des grains anhydres qui gênent ou stoppent leur hydratation (cœur anhydre inaccessible).

Dans d'autres cas, c'est la précipitation des hydrates qui est gênée.

Nature des adjuvants et mécanismes d'action :

Ce sont des tensio-actifs tels que les acides gras ou les alkyls sulfonates. Ces adjuvants ont pour rôle de stabiliser les bulles d'air formées au cours du malaxage (ils ne les créent pas).

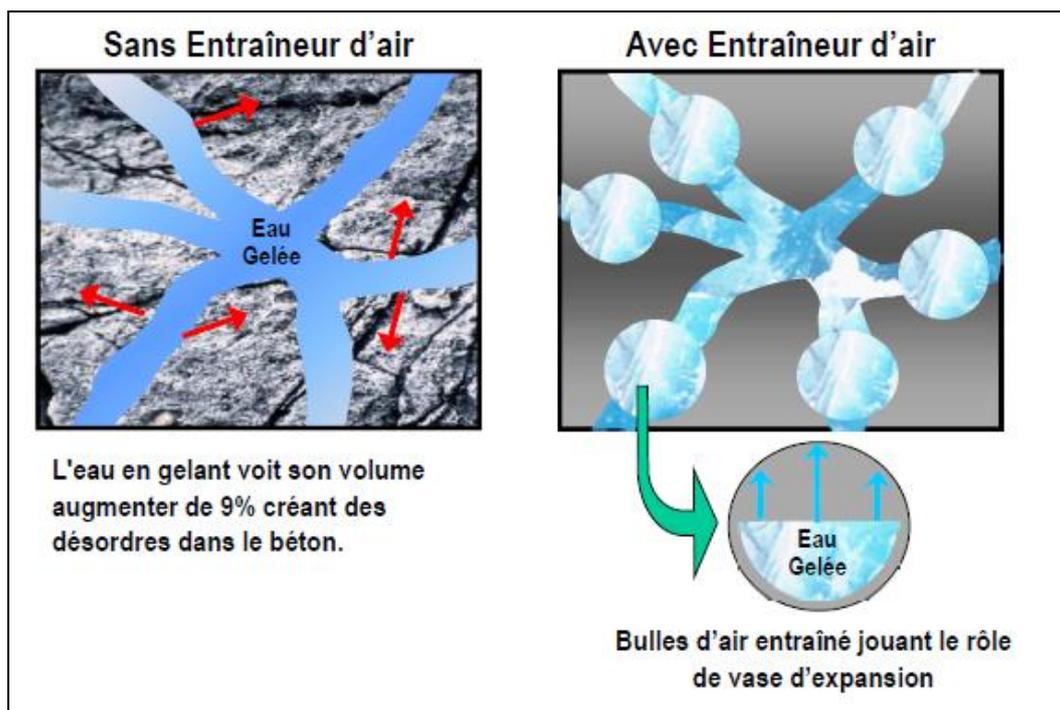


Figure I.5 : Résultats observés avec entraîneur d'air et sans entraîneur d'air.

I.2.4. Rôle des adjuvants :

On utilise les adjuvants surtout pour :

- Diminuer le coût des constructions en béton.
- Donner au béton certaines caractéristiques plus efficacement que par d'autres moyens.
- Assurer la qualité du béton durant le malaxage, le transport, la mise en place et la cure dans des conditions météorologiques défavorables.
- Obéir à certaines urgences durant le bétonnage. [18]

Tebbal .N a varié le dosage en SP de 0,6 ; 0,8 ; 1 ; 1,2 ; 1,5 et 2%. Il a constaté qu'on s'aperçoit qu'à partir d'un certain point que l'on nomme point de saturation, il n'ya plus d'amélioration de l'ouvrabilité, ce point se situe entre 1,5 et 2%, il a estimé de 1,8%. [19]

I.3. Généralités sur le béton avec les additions minérales :

Les substances minérales utilisées comme ajouts en cimenterie ou additifs lors de la confection du béton contribuent par leur activité physique, hydraulique et pouzzolaniques à améliorer le comportement des ciments à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Plusieurs types d'ajouts sont bien connus tels que les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, les laitiers des hauts fourneaux ainsi que la fumée de silice. Ces produits deviennent plus actifs dans les solutions alcalines du ciment et donnent naissance à de nouveaux hydrates qui confèrent aux bétons une plus grande résistance mécanique et une meilleure durabilité. Par leur activité de surface et leur distribution granulaire, ils jouent un rôle fondamental dans le comportement rhéologique du béton. [20]

I.3.1. Définition :

La norme européenne **EN 206-1 (NF P 18-325)** définit les additions comme des « matériaux minéraux finement divisés utilisés dans le béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières ».

L'action des additions concerne aussi bien l'état frais que l'état durcis du béton. En premier lieu, à l'état frais, la présence des additions modifie la structure du squelette granulaire du matériau et les frictions entre les composants de la suspension solide dans la phase liquide. En second lieu, au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment et peuvent modifier la structuration des produits hydratés. En troisième lieu, certaines additions ont la capacité de réagir chimiquement en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant additionnel à celui résultant de l'hydratation du ciment et que les anglo-saxons précisent sous le terme de « supplementary cementitious materials ». De plus, ces différents aspects de l'action des additions peuvent intervenir de manière simultanée rendant particulièrement difficile l'évaluation de la contribution des additions minérales aux performances des matériaux cimentaire. [21]

I.3.3. Types d'additions minérales :

Les ajouts minéraux se substituant au ciment peuvent être classés en fines actives telles que la fumée de silice et la pouzzolane naturelle et en fines inertes telles que le calcaire. Par ailleurs, le cadre normatif français propose six matériaux minéraux répondant à la définition « additions pour béton hydraulique » à savoir :

- Additions de type I selon la norme **EN 206-1** :
 - Les additions calcaires (**NF P 18-308**) ;
 - Les additions siliceuses (**NF P 18-509**) ;

- Les fillers (NF P 18-501).
- Additions de type II selon la norme EN 206-1 :
 - La fumée de silice (NF P 78-502) ;
 - Les cendres volantes de houille (NF P 18-505) ;
 - Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau (NF P 18-506) ;
 - La pouzzolane naturelle (EN 197-1). [20]

I.3.2.1. Les fillers calcaires (FC) :

Le calcaire est une roche sédimentaire, composée majoritairement de carbonate de calcium CaCO_3 . Le calcaire a été introduit dans la fabrication des ciments à la suite des deux guerres mondiales pour augmenter la production et satisfaire la demande accrue de ce produit. Ainsi, son emploi a donné des résultats prometteurs de résistance et de durabilité.

On désigne souvent par fillers des matières inertes qui, en milieu neutre ou alcalin, sont dans une large mesure insolubles; elles n'ont pas de réactions chimiques et ne contribuent pas directement au développement de la résistance des bétons et mortiers. Il y a peu de matières qui, comme les poudres de quartz par exemple, répondent à cette définition très restrictive. La définition des fillers, qui, selon la norme SIA 215.002 (correspond à ENV 197-1), peuvent être utilisés dans les ciments CEM, est beaucoup plus étendue : «Les fillers sont des matières inorganiques minérales, naturelles ou artificielles spécialement sélectionnées, qui après une préparation appropriée, en fonction de leur granulométrie, améliorent les propriétés physiques des ciments (telles que l'ouvrabilité ou le pouvoir de rétention d'eau). Ils peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques, hydrauliques latentes ou pouzzolaniques; aucune exigence n'est toutefois requise à cet égard. Ils ne doivent pas accroître sensiblement la demande en eau du ciment ni diminuer en aucune manière la résistance du béton ou du mortier à la détérioration, et la protection des armatures contre la corrosion.»

Sur la base de cette définition, les pouzzolanes naturelles ou artificielles peuvent également être comptées parmi les fillers, si elles sont suffisamment fines. Rappelons que les cendres volantes et les fumées de silice témoignent non seulement de propriétés pouzzolaniques accentuées, mais également de propriétés de fillers. [22]

I.3.2.2. Effet des fillers calcaires en général :

Les fillers finement moulus constituent un complément du ciment dans le domaine des fines: ils ont un effet stabilisant dans la pâte de ciment, grâce au meilleur remplissage des vides. L'augmentation de la résistance est généralement parallèle à celle de la densité de tassement. C'est ce que démontre la figure 1, qui représente l'influence sur la résistance à la compression exercée par l'adjonction de 15 % en masse (par rapport à la teneur en ciment), respectivement de farine de calcaire (surface spécifique 3400 cm²/g), de poudre de quartz (surface spécifique 14500 cm²/g) et de fumée de silice (béton de référence: 360 kg de ciment Portland, facteur E/C 0,45). Des deux fillers inertes, c'est la poudre de quartz - plus fine que la farine de calcaire - qui provoque la plus grande augmentation de la résistance; avec la fumée de silice, l'augmentation de la résistance est due principalement à la réaction pouzzolanique. L'adjonction de fillers n'améliore pas l'étanchéité des bétons. S'ils sont suffisamment fins, les fillers ne nuisent pas à la résistance au gel du béton. Plusieurs paramètres doivent être pris en considération pour déterminer la quantité de fillers à ajouter. Les matières premières (fractions fines), la composition du mélange et les performances requises du béton sont les paramètres déterminants. On dose généralement les fillers à raison de 5 à 15 % de la teneur en ciment, en veillant à ce que la teneur en fines admissible de 3 à 8 % des granulats, prescrite au chapitre 5 14 24 de la norme **SIA 162**, ne soit pas dépassée. La fraction des fines comprend le ciment et la part des granulats et ajouts dont le diamètre des grains est inférieur à 0,125 mm. [23]

I.3.2.3. Influence des fillers calcaires sur les propriétés du béton :

Si un filler de calcaire est essentiellement utilisé comme une addition inerte permettant de remplacer une partie du ciment et éventuellement d'augmenter le volume de poudre dans le béton, son influence sur les propriétés du béton depuis l'état frais jusqu'à l'état durci est un aspect important à prendre en compte pour limiter l'apparition de désordres (homogénéité, aspect de surface, baisse des résistances). [25]

Anissa Bessa Badreddine a utilisé 10%, 20%, 30%, 50% de fillers de calcaire. Elle a trouvé que le 30% est le dosage optimum pour la substitution du ciment et au-delà de cette valeur (50%) une diminution de l'ouvrabilité du béton et ça demande d'utiliser un adjuvant. [24]

I.4. Conclusion :

Le matériau béton, est irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques. Le compromis trouvé entre résistance mécanique, économie, esthétique et facilité de mise en œuvre, offre à ce matériau la première place dans la construction au niveau mondial. Au niveau régional et national le béton est le matériau de construction utilisé par excellence au sein de tous les chantiers, aussi bien dans les secteurs du bâtiment que ceux des travaux publics ; il n'a pas de substitut économique et performant à condition qu'il présente les qualités requises.

Nous avons fait une étude générale sur le béton, ses constituants, ses propriétés physique et mécaniques et domaine d'utilisation ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

Ensuite, nous sommes intéressés aux adjuvants et leurs rôles sur le comportement physico-mécanique du béton et en particulier les superplastifiants. Nous avons utilisé aussi les additions minérales (fillers calcaires).

Dans le chapitre suivant, nous avons basé sur les différentes méthodes de caractérisation physique et mécanique du béton.

Chapitre II
Caractérisation des matériaux
et
Méthodes expérimentales

II.1. Introduction :

A la suite de l'étude bibliographique, une série d'essais physiques et mécaniques au laboratoire était l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux : masses volumiques absolue et apparente, analyse granulométrique, consistance et prise du ciment, essai destructif et d'autres non destructifs.

Le propos de ce document est de présenter les techniques expérimentales utilisées dans le laboratoire, et aussi donner les différents principes et les modes opératoires propres à chacune des techniques abordées, sans entrer dans trop de détails.

II.2. Caractéristiques physiques :

II.2.1. Masse volumique apparente : [NFP 18-559]

II.2.1.1. But de l'essai :

Cet essai permet de déterminer la masse volumique apparente de 5 corps différents (ciment, sable, 2 types de gravier et du filler de calcaire (FC)), c'est-à-dire, la masse en g (gramme) de ce corps pour 1cm³ de volume. Cette masse volumique apparente est appelée ρ (rau).

II.2.1.2. Principe de l'essai :

Il suffit de remplir un récipient, dont on connaît le volume, en prenant de grandes précautions pour éviter tous phénomènes parasites que pourrait provoquer le tassement trop important ou trop faible donnerait un résultat erroné. Pour limiter ce risque d'erreurs, l'essai se fera sur plusieurs pesées, avec lesquels on fera une moyenne. On pèse ensuite l'échantillon, en ayant pris soin de déduire la masse du récipient. Enfin, la masse de l'échantillon est divisée par le volume du récipient. Le résultat final nous donne donc la valeur de la masse volumique apparente du matériau.

$$P = M/V$$

M = masse du matériau étudié, tel que $M = M_1 - M_0$

M_0 = masse du récipient vide = 445g.

M_1 = masse du récipient rempli.

V = volume du récipient = 1020 cm³.

II.2.1.3. Matériels utilisés :

Le matériel est très limité, et se compose d'un récipient en métal de forme cylindrique, une balance, une règle pour arasement du récipient (figure II.1).



Figure II.1 : Matériels utilisés pour l'essai de la masse volumique apparente.

II.2.1.4. Mode opératoire :

Nous avons procédé comme suit :

- Nous avons pris un récipient et nous avons calculé son volume ;
- Nous avons pesé ce récipient et nous avons noté sa masse ;
- Nous avons pris le matériau dans les mains formant un entonnoir ;
- Nous avons placé les deux mains à environ 10 cm au-dessus du récipient et nous avons laissé le matériau s'écouler lentement.
- Nous avons laissé couler le matériau toujours au centre du récipient, jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône (talus naturel).
- Nous avons arasé à la règle avec précaution la partie du matériau dépassant des bords supérieurs du récipient.
- Nous avons pesé l'ensemble et nous avons noté le résultat.
- Nous avons recommencé l'opération avec chaque matériau.
- Pour tous les résultats obtenus, nous avons divisé les masses par le volume et nous avons fait la moyenne des 2 résultats.

II.2.1.5. Résultats obtenus :

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : Masse volumique apparente des matériaux.

types de granulats	Ciment	Sable	gravier G ₁	gravier G ₂	FC
ρ [g/cm ³]	1.16	1.42	1.34	1.37	1.43

II.2.2. Masse volumique absolue : [NF EN 1097-6]

II.2.2.1. But de l'essai :

Cet essai permet de déterminer la masse volumique absolue de 5 corps différents (ciment, sables, 2 types de gravier et du filler calcaire (FC)), c'est-à-dire, la masse en g (gramme) de ce corps pour 1cm³ de volume, mais uniquement la masse des différents grains constituant le granulats, c'est-à-dire, que l'on ne tient absolument pas compte des vides qui peuvent être situés entre les grains. Cette masse volumique absolue est appelée ρ_s (**rau**).

II.2.2.2. Principe de l'essai :

En partant d'une masse d'agrégats et en le plongeant dans un volume d'eau, on obtiendra la masse volumique absolue de ce dernier par la division de cette masse par la différence de volume.

$$\rho_s = M / V$$

M = masse du matériau étudié.

$$V = V_2 - V_1$$

V₁ = volume dans l'éprouvette avant introduire de la masse d'agrégat.

V₂ = volume dans l'éprouvette après introduire de la masse d'agrégat.

NB: pour le ciment et les fillers calcaires, nous avons utilisé de l'essence et non pas de l'eau pour éviter les réactions chimiques qui puissent intervenir.

II.2.2.3. Matériels utilisés :

Le matériel utilisé est limité, et se compose d'une éprouvette graduée et d'une balance (figure II.2).



Figure II.2 : Matériels utilisés pour l'essai de la masse volumique absolue.

II.2.2.4. Mode opératoire :

Nous avons procédé comme suit :

- Nous avons remplis une éprouvette avec un volume d'eau V_1 et nous avons noté sa valeur ;
- Nous avons pesé un échantillon sec de granulats (environ 300g) ;
- Nous avons introduit l'échantillon dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer les bulles d'air ;
- Nous avons repéré la valeur du nouveau volume et la noté ;
- Nous avons effectué les calculs.

II.2.2.5. Résultats obtenus :

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : Masse volumique absolue des matériaux.

types de granulats	Ciment	Sable	gravier G_1	gravier G_2	FC
ρ_s [g/cm ³]	3	2.70	2.73	2.56	2.85

II.2.3. Analyse granulométrique : [NF X 11-504]

On a utilisé deux fractions différentes de gravier ; G_1 (8/15), G_2 (15/25) et un sable de dune.



Figure II.3 : Matériaux utilisés.

II.2.3.1. Définition :

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, ...).

II.2.3.2. Intérêt en génie civil :

L'analyse granulométrique permet de distinguer les granulats suivant des classes granulaires qui sont commercialisées par les fabricants.

L'élaboration d'une composition de béton nécessite une connaissance parfaite de la granulométrie et de la granularité, car la résistance et l'ouvrabilité (maniabilité) du béton dépendent essentiellement du granulat. Par ailleurs, les dimensions maximales **D** du granulat se trouvent limitée par différentes considérations concernant l'ouvrage à bétonner :

- Epaisseur de la pièce du béton ;
- Espacement des armatures ;
- Densité du ferrailage ;
- Complexité du coffrage ;
- Risque de ségrégation (béton non homogène) ...

II.2.3.3. Principe de l'analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a trois buts :

- Déterminer les dimensions des grains ;
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral) ;
- En déduire le module de finesse (**Mf**).

Les granulats utilisés dans le domaine du bâtiment du génie civil sont des matériaux roulés ou concassés d'origines naturelle ou artificielle, de dimension comprise entre 0 et 80 mm. Ils ne sont généralement pas constitués par des éléments de tailles égales mais par un ensemble de grains dont les tailles variées et répartissent en deux limites : la plus petite (**d**), et la plus grande (**D**), dimensions en mm.

II.2.3.4. Matériels nécessaires :

- Tamiseuse électrique ;
- Une série de tamis conformes à la norme **NF X 11-504** ;
- Un couvercle qui évite la perte de matériau pendant le tamisage et un réceptacle de fond pour recueillir le dernier tamisât ;
- Des récipients ;

- Une main écope pour le remplissage ;
- Une balance.



Figure II.4 : Tamiseuse électrique.

II.2.3.5. Mode opératoire :

- Nous avons monté la colonne de tamis dans l'ordre décroissant de l'ouverture des mailles en ajoutant le couvercle et le fond ;
- Nous avons versé le matériau sec dans la colonne de tamis ;
- Nous avons agité mécaniquement cette colonne ;
- Nous avons repris un par un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture, en adaptant un fond et un couvercle ;
- Nous avons agité manuellement chaque tamis jusqu'à ce que le refus du tamis ne varie pas de plus de 1% en masse par minute de tamisage ;
- Nous avons versé le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur.
- Nous avons déterminé ainsi la masse du refus de chaque tamis ;
- Nous avons poursuivi l'opération jusqu'à déterminer la masse du refus contenus dans la fond de la colonne de tamis ;
- Nous avons vérifié la validité de l'analyse granulométrique imposée par la norme **NF EN 933-1** (Différence entre les masses de refus et des tamisât et de la masse initiale).

II.2.3.6. Dimensionnement des tamis utilisés :

- Pour le sable, on a utilisé des tamis d'ouvertures 0.08, 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 3.15 et 5 [mm].
- Pour les graviers **G₁ (8/15)**, on a utilisé des tamis d'ouvertures 8, 10, 12.5, 14 et 16 [mm].
- Pour les graviers **G₂ (15/25)**, on a utilisé des tamis d'ouvertures 14, 16, 20 et 25 [mm].

II.2.3.7. Résultats obtenus :**Sable (0/5) :****Tableau II.3 :** Analyse granulométrique du sable.

Tamis (mm)	Refus particuliers (g)	Refus cumulés (g)	Refus (%)	Tamisât (%)
5	0	0	0	100
3.15	0.04	0.04	0.004	99.996
2.5	0.97	1.01	0.10	99.9
1.25	0.05	1.06	0.11	99.89
0.63	0.58	1.64	0.16	99.84
0.315	27.20	28.84	2.91	97.09
0.16	816.39	845.23	85.42	14.58
0.08	143.37	988.6	99.91	0.09
< 0.08	0.90	989.5	100	0

Gravier G₁ (8/15) :

Tableau II.4 : Analyse granulométrique du gravier G₁ (8/15).

Tamis (mm)	Refus particuliers (g)	Refus cumulés (g)	Refus (%)	Tamisât (%)
15	106.5	106.5	3.55	96.45
14	163.81	270.31	9.01	90.99
12.5	474.72	745.03	24.86	75.14
10	850	1595.03	53.22	46.78
8	790	2385.03	79.58	20.42
< 8	611.94	2996.9	100	0

Gravier G₂ (15/25) :

Tableau II.5 : Analyse granulométrique du gravier G₂ (15/25).

Tamis (mm)	Refus particuliers (g)	Refus cumulés (g)	Refus (%)	Tamisât (%)
25	205.85	205.85	4.12	95.88+
20	1422.87	1628.72	32.58	67.42
16	918.05	2546.77	50.95	49.05
15	659.19	3205.96	64.14	35.86
< 15	1792.62	4998.58	100	0

II.2.3.8. Module de finesse :

C'est le centième de la somme des refus cumulés (exprimé en pourcentage de poids) aux tamis 0.16, 0.315, 0.63, 0.125, 2.50 et 5.

$$Mf = \frac{\text{Somme des pourcentages des refus cumulés des tamis concernés}}{100}$$

$$Mf = \frac{85.42 + 2.91 + 0.16 + 0.11 + 0.10 + 0.004}{100}$$

$$Mf = 0.90$$

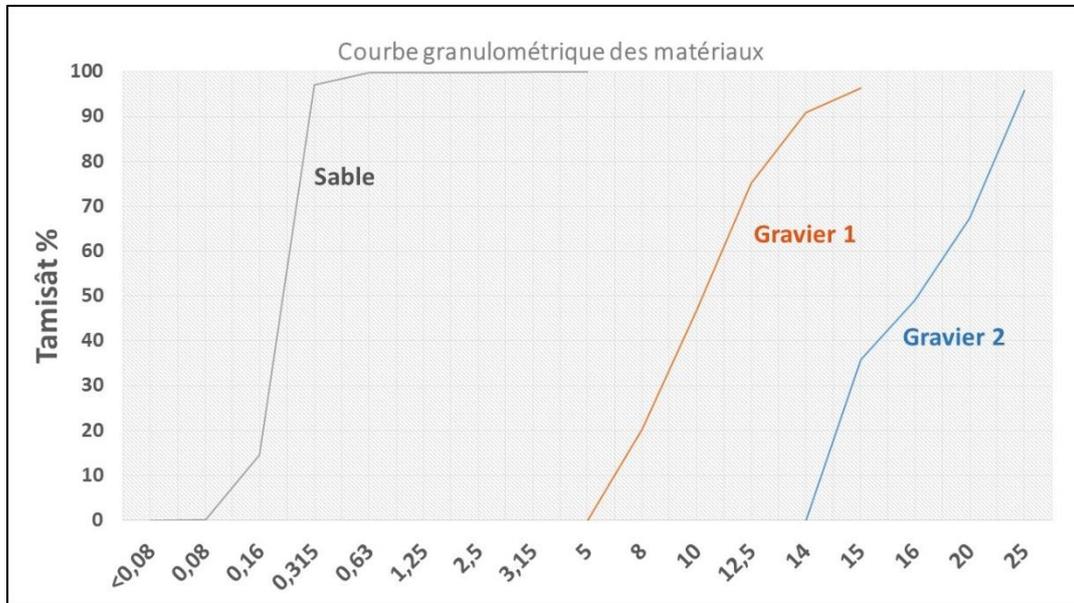


Figure II.5 : Courbe granulométrique.

II.2.4. Equivalent de sable :

Le sable est un élément très essentiel qui joue un rôle très important dans la composition du béton vis-à-vis des ouvrages en béton armé, pour ça il faut être très vigilant dans le choix du sable qui convient et qui a des meilleures caractéristiques qui donnent un béton solide homogène résistant. L'essai est conduit selon la norme **NF EN 933-8**.

II.2.4.1. But de l'essai :

Cet essai est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté de sable utilisé pour la composition du béton. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de sable.

II.2.4.2. Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la proportion 0/5 mm du matériau, nous avons lavé l'échantillon et nous avons laissé reposer le tour pendant 20mn, et nous avons déduit l'équivalent de sable :

$$ES = h_2/h_1 * 100$$

ES = Equivalent de sable.

Hauteur h_1 = sable propre + éléments fines.

Hauteur h_2 = sable propre seulement.

II.2.4.3. Matériels utilisés :

- Une balance ;
- Eprouvette en plexiglas avec deux traits supérieur et inférieur ;
- Entonnoir pour l'introduction du sable ;
- Bonbonne de 5l pour la solution lavant avec son bouchon et siphon et tube souple de 1.5 m ;
- Tube laveur métallique plongeant ;
- Machine agitatrice ;
- Règle métallique pour mesure ;
- Piston taré à masse coulissante de 1 kg pour la mesure de ES.



Figure II.6 : Essai de l'équivalent de sable.

II.2.4.4. Mode opératoire :

- Nous avons remplis de la solution lavant jusqu'au premier trait ;
- Nous avons pesé des 120 g de sable sec ;
- Imbibition de sable pendant 20 minutes dans la solution lavant ;
- Eprouvette secouée (60cycles en 30 secondes) ;

- Nous avons lavé le sable avec la solution lavant jusqu'au trait supérieur ;
- Début de la décantation ;
- Nous avons mesuré les hauteurs h_2 et h_1 après 20 minutes de décantation ;

II.2.4.5. Résultats obtenus :

Le tableau II.6 présente les valeurs de trois essais de l'équivalent de sable.

Tableau II.6 : Résultats obtenus pour l'ES.

Essai	M[g]	h1 [cm]	H2 [cm]	ES [%]
1	120	13.7	10	72
2	120	13.4	10.2	76
3	120	13.8	10.8	78

$$ES = 75.33 \%$$

D'après la valeur trouvée, on remarque que le sable utilisé est un sable propre convenant au béton à haute qualité. (voir l'annexe II.1)

II.3. Caractéristiques du ciment :

Le ciment utilisé est un ciment du type portland au calcaire **NA442** CEMII/B-L 42.5 N, fabriqué par la cimenterie de **LAFARGE** de la wilaya de M'sila.



Figure II.7 : Ciment utilisé.

II.3.1. La consistance normalisée :

II.3.1.1. Définition :

La consistance de la pâte du ciment est sa plus ou moins grande fluidité. C'est une caractéristique qui évolue au cours du temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées. La consistance dite « consistance normalisée » peut être déterminée par l'essai en utilisant un appareil qui s'appelle « Vicat » conformément à la norme 196-3. La distance (d) l'aptitude de la consistance de la pâte étudiée.

- Si $(d) = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$, on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée.
- Si (d) n'atteint pas cette valeur, c'est-à-dire $(d) > 7\text{mm}$ ou $(d) < 5\text{mm}$, il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

II.3.1.2. But de l'essai :

Le but de l'essai est de déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage des ciments.

II.3.1.3. Matériels nécessaires :

- Une salle de température $20^\circ \pm 1^\circ\text{C}$ et dont l'humidité relative est supérieure à 90% ;
- Appareil de Vicat ;
- Une sonde normalisée de diamètre de 10mm et de longueur 50mm ;
- Balance précise à 0.1 g près ;
- Une plaque en verre de base plane ;
- Des éprouvettes graduées en plastique ;
- Une spatule ;
- Des bacs en plastique pour effectuer les essais ;
- Chronomètre précise à 0.1s près.



Figure II.8 : Appareil de Vicat.

II.3.1.4. Mode opératoire :

- Nous avons effectué un échantillon de pâte de ciment (500g de ciment + eau) conformément à la norme, pour les teneurs en eau suivantes : 28%, 29%, 30%.

Tableau II.7 : Résultats obtenus pour la consistance normale.

Pourcentage d'eau		
28 %	29 %	30 %

- Nous avons réalisé l'essai avec l'appareil de Vicat et nous avons noté la valeur de l'index correspondant à l'enfoncement de la sonde.

II.3.1.5. Résultats obtenus :

D'après l'essai de consistance normale, nous avons trouvé que le pourcentage **29 %** est la quantité nécessaire pour obtenir une pâte du ciment normalisée.

II.3.2. La prise du ciment : [EN 196-3]

II.3.2.1. Définition :

La présence de régulateur de prise dans la masse des liants hydrauliques offre à ces derniers, après gâchage, une prise qui commence après quelques heures.

II.3.2.2. But de l'essai :

Il est nécessaire de connaître le temps de début de prise des liants hydrauliques en vue de déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre in situ des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés.

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

II.3.2.3. Matériels nécessaires :

C'est le même appareil utilisé dans l'essai de consistance (dans les mêmes conditions : température $T = 20^{\circ}\text{C}$; humidité $HR = 95\%$) à l'exception de la sonde qui cisaille l'échantillon, le diamètre est beaucoup plus petit ($F = 1.13 \text{ mm}$).



Figure II.9 : Essai de la prise du ciment.

II.3.2.4. Mode opératoire :

- Nous avons réglé l'appareil de Vicat muni de l'aiguille par abaissement de celle-ci jusqu'à la plaque de base plane et par ajustement du repère au zéro de l'échelle ;
- Nous avons relevé l'aiguille en position d'attente ;
- Nous avons préparé la pâte de ciment comme pour l'essai de consistance en introduisant la quantité d'eau déterminée pour la pâte de consistance normalisée ;
- Nous avons introduit rapidement la pâte dans un moule tronconique sans tassement excessif (le moule étant placé sur la plaque de base plane) et placé l'ensemble dans l'axe de la sonde de l'appareil de Vicat ;
- Nous avons amené l'aiguille à la surface de l'échantillon ;
- Nous avons lâché l'aiguille sans vitesse initiale, cette dernière s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30s d'attente), nous avons relevé la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base ;
- Nous avons recommencé l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés (-10 -15 mn) jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$. (nous avons nettoyé l'aiguille à chaque opération).

II.3.2.5. Résultats obtenus :

Après une à deux heures, pour la plupart des ciments, une augmentation brusque de la viscosité se produit, accompagnée d'un dégagement de chaleur – c'est le début de prise.

La fin de prise est effective lorsque la pâte cesse d'être déformable et devient un matériau rigide.

Tableau II.8 : Résultats obtenus pour la prise du ciment.

Ciment	Début de prise	Fin de prise
		2h10min

II.4. Caractérisation des fillers calcaires :

Ce sont des déchets de concassage des roches calcaires composées essentiellement de calcite CaCO_3 avec une teneur supérieure à 80%, ce sont des poudres fines de couleur blanche et les caractéristiques physiques sont regroupées aux tableaux **II.1** et **II.2**.

II.5. Caractérisation du superplastifiant :

Nous avons utilisé le superplastifiant « MEDAPLAST SP 40 » de l'entreprise de **Granitex**, et la fiche technique qui exprime les différentes caractéristiques de ce **SP** est représentée dans l'annexe.



Figure II.10 : Superplastifiant utilisé.

II.6. Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée pour la confection de différents mélanges (Béton ordinaire, béton adjuvanté et béton avec fillers de calcaire) provient du réseau public de distribution d'eau potable.

II.7. Formulation du béton :

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la formulation des bétons à mettre en œuvre telles que : FAURY, BOLOMEY, VALETTE, JOISEL, et la méthode DREUX-GORISSE.

Nous avons utilisé la formulation du DREUX-GORISSE, en premier lieu nous avons fixé l'affaissement à **7 cm**, et en second lieu nous avons changé pour chaque mélange le dosage en ciment (nous avons travaillé avec trois différents dosages : **250kg, 300kg et 350kg**).

Cette méthode a pour un but de définir d'une façon simple et rapide une composition à peu près adaptée au béton étudié. Mais seule la confection d'éprouvette permettra d'ajuster au mieux la confection à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées, et des matériaux utilisés.

II.7.1. Données de base :

- $F_{c28} = 25 \text{ Mpa}$;
- $D_{\max} = 25 \text{ mm}$;
- Caractéristiques des granulats : (tableau II.2) ;
- $A_c = 7 \text{ cm}$; nous avons fixé l'affaissement à 7 cm et d'après l'abaque (illustrée dans l'annexe), nous avons cherché le rapport E/C pour chaque dosage en ciment.

Tableau II.9 : Le rapport C/E en fonction du dosage en ciment.

Dosages du ciment (kg)	C/E
GK 250	1.2
GK 003	1.48
GK 053	1.72

II.7.2. Résistance souhaitée :

$$F_c = F_{c28} + 0.15 F_{c28}$$

$$F_c = 25 + 0.15 (25)$$

$$F_c = 28.75 \text{ Mpa}$$

II.7.3. Dosage en ciment :

Nous avons 3 différents dosages en ciment : 250 kg, 300kg et 350 kg.

II.7.4. Dosage en eau :

$$E = \frac{C}{C/E}$$

C = 250 Kg, d’après l’abaque du rapport C/E (annexe II.2), C/E = 1.2

Donc, on trouve E = 208.33 L.

Tableau II.10 : Dosage en eau en fonction du dosage en ciment.

Dosages du ciment (kg)	E
250 Kg	208.33 L
300 Kg	202.70 L
350 Kg	203.49 L

II.7.5. Courbe de référence :

- ✓ : Origine
- ✓ A : (X_A; Y_A) tel que : X_A = [5 ; D]/2 {D > 20mm}
- $Y_A = 50 - \sqrt{Dmax} + k + ks + kp$
- ✓ B : (D_{max} ; 100%)

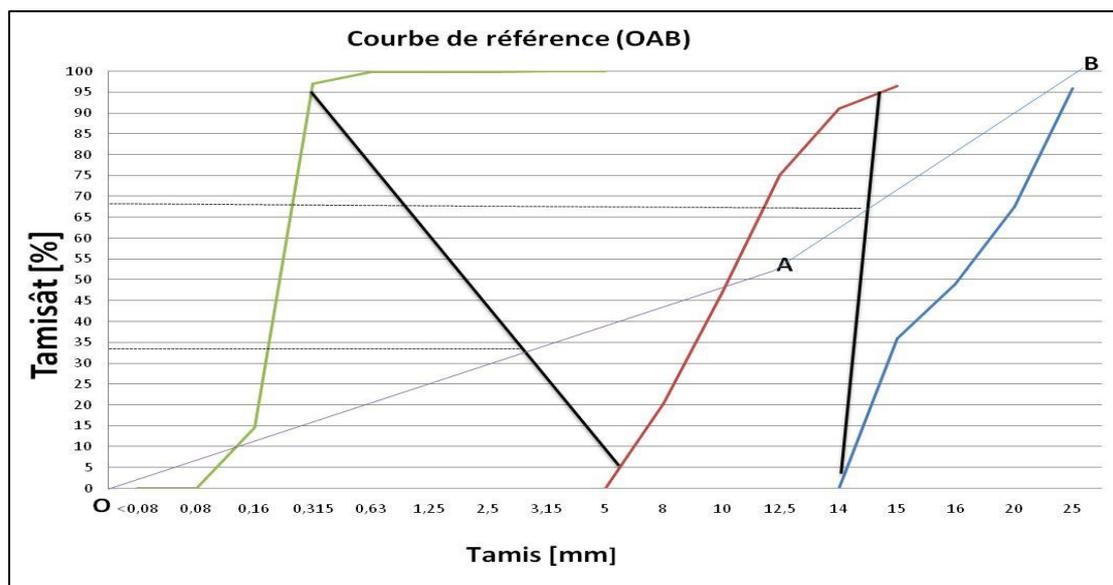


Figure II.11 : Courbe de référence

II.7.6. Dosage du sable et des graviers :

Après avoir tracé la courbe de référence, il nous reste alors à déterminer les proportions du sable, graviers à utiliser afin que la courbe granulométrique réelle s'approche-le plus de celle de référence.

On trace les lignes de partage joignant les points suivants, le point d'ordonné 95% de la première courbe (celle du sable) et le point d'ordonné 5% du premier gravier G_1 de la deuxième courbe et ainsi de suite.

Les points d'intersection de ces lignes de partage avec la courbe de référence nous donnent les proportions en volume absolu du sable et de gravier $G_1 \dots$ etc.

➤ Proportion des divers granulats :

Après le traçage de la courbe, nous avons obtenu les proportions suivantes :

- $S = 39 \%$
- $G_1 = 26 \%$
- $G_2 = 35 \%$

II.7.7. Calcul des quantités nécessaires des constituas pour 1 m^3 :

A partir des proportions obtenues, il nous reste à déterminer les quantités à prendre, pour cela on utilise :

- Coefficient de compacité (γ) :

$$\gamma = \frac{V_s + V_{g1} + V_{g2} + V_c}{V_{tot}}$$

$$V_{tot} = 1000 \text{ L}$$

Donc, $1000 \cdot \gamma = V_s + V_{g1} + V_{g2} + V_c$

On parle ici du volume absolu, puisque l'on connaît le dosage ne ciment, il suffit de diviser ce dosage par la masse volumique du ciment pour obtenir du volume.

$$V_c = \frac{C}{\rho}$$

$$V_c = 83.33 \text{ L}$$

D'après la méthode d'interpolation, (Voir l'annexe II.4), on a trouvé :

$$\gamma = 0.827$$

- Volume des granulats : $V_g = 1000 \cdot 0.827 - V_c = 743.67 \text{ L}$

- Le volume du sable : $V_s = \rho_s \cdot V_g$

$$V_s = 290 \text{ L}$$

- Le volume de gravier G_1 : $V_{g1} = \rho_{g1} * V_g$

$$V_{g1} = 193.35 \text{ L}$$

- Le volume de gravier G_2 : $V_{g2} = \rho_{g2} * V_g$

$$V_{g2} = 260.27 \text{ L}$$

- La masse du sable : $M_s = \rho_s * V_s$

$$M_s = 783 \text{ Kg}$$

- La masse du gravier G_1 : $M_{g1} = \rho_{g1} * V_{g1}$

$$M_{g1} = 527.84 \text{ Kg}$$

- La masse du gravier G_2 : $M_{g2} = \rho_{g2} * V_{g2}$

$$M_{g2} = 666.29 \text{ Kg}$$

II.8. Elaboration des mélanges :

II.8.1. Définition du béton élaboré :

Nous avons élaboré **un béton ordinaire** avec des différents dosages du ciment (**250kg, 300kg, 350kg**) ; nous avons aussi élaboré **un béton adjuvanté** avec un pourcentage du **SP** fixe (**SP=1.8%**) et des différents dosages du ciment (250kg, 300kg, 350kg) et finalement, nous avons aussi élaboré **un béton avec des Fillers de calcaires (FC=30%)** et toujours les différents dosages du ciment (250kg, 300kg et 350kg).

Les tableaux suivants représentent les différentes formulations du béton ordinaire, celles du béton adjuvanté et celles du béton avec FC, avec différents dosages du ciment :

II.8.1.1. Composition des bétons ordinaires (sans SP) :

Les tableaux suivants (tableau II.11, tableau II.12 et tableau II.13) représentent les compositions du béton ordinaire avec les différents dosages du ciment :

Tableau II.11 : Composition d'un **B.O** pour 1 m³ avec **250 kg** du ciment.

Constituants	Composition pour 1 m ³ de 250kg du ciment
Ciment	250 kg
Sable (0/5)	783 kg
Gravier G_1 (8/15)	527.84 kg
Gravier G_2 (15/25)	666.29kg
Eau	208.33 L

Tableau II.12 : Composition d'un **B.O** pour 1 m³ avec **300 kg** du ciment.

Constituants	Composition pour 1 m ³ de 300kg du ciment
Ciment	300 kg
Sable (0/5)	745.90 kg
Gravier G ₁ (8/15)	575.56 kg
Gravier G ₂ (15/25)	614.17 kg
Eau	202.70 L

Tableau II.13 : Composition d'un **B.O** pour 1 m³ avec **350 kg** du ciment.

Constituants	Composition pour 1 m ³ de 350kg du ciment
Ciment	350 kg
Sable (0/5)	709.61 kg
Gravier G ₁ (8/15)	581.76 kg
Gravier G ₂ (15/25)	600.09 kg
Eau	203.49 L

II.8.1.2. Composition des bétons adjuvantés (avec SP) :

Les tableaux suivants (tableau II.14, tableau II.15 et tableau II.16) regroupent les compositions du béton adjuvanté avec un SP, avec les différents dosages du ciment :

Tableau II.14 : Composition d'un **B.Adj** pour 1 m³ avec **250 kg** du ciment.

Constituants	Composition pour 1 m ³ de 250kg du ciment
Ciment	250 kg
Sable (0/5)	783 kg
Gravier G ₁ (8/15)	527.84 kg
Gravier G ₂ (15/25)	666.29 kg
Eau	204.91 L
SP	1.5 L

Tableau II.15 : Composition d'un **B.Adj** pour 1 m³ de 300 kg du ciment.

Constituants	Composition pour 1 m ³ de 300kg du ciment
Ciment	300 kg
Sable (0/5)	745.90 kg
Gravier G ₁ (8/15)	575.56 kg
Gravier G ₂ (15/25)	614.17 kg
Eau	202.70 L
SP	1.8 L

Tableau II.16 : Composition d'un **B.Adj** pour 1 m³ de 350 kg du ciment.

Constituants	Composition pour 1 m ³ de 350kg du ciment
Ciment	350 kg
Sable (0/5)	709.61 kg
Gravier G ₁ (8/15)	581.76 kg
Gravier G ₂ (15/25)	600.09 kg
Eau	203.49 L
SP	2.1 L

II.8.1.3. Composition des bétons avec des FC :

Les tableaux suivants (tableau II.17, tableau II.18 et tableau II.19) regroupent les compositions du béton avec FC, avec les différents dosages du ciment :

Tableau II.17 : Composition d'un B.FC pour 1 m³ avec 250 kg du ciment.

Constituants	Composition pour 1 m ³ de 250kg du ciment
Ciment	250 kg
Sable (0/5)	783 kg
Gravier G ₁ (8/15)	527.84 kg
Gravier G ₂ (15/25)	666.29 kg
Eau	208.33 L
FC	1.5 kg

Tableau II.18 : Composition d'un B.FC pour 1 m³ de 300 kg du ciment.

Constituants	Composition pour 1 m ³ de 300kg du ciment
Ciment	300 kg
Sable (0/5)	745.90 kg
Gravier G ₁ (8/15)	575.56 kg
Gravier G ₂ (15/25)	614.17 kg
Eau	202.70 L
FC	1.8 kg

Tableau II.19 : Composition d'un B.FC pour 1 m³ de 350 kg du ciment.

Constituants	Composition pour 1 m ³ de 350kg du ciment
Ciment	350 kg
Sable (0/5)	709.61 kg
Gravier G ₁ (8/15)	581.76 kg
Gravier G ₂ (15/25)	600.09 kg
Eau	203.49 L
FC	2.1 kg

II.8.1.4. Les différentes étapes de formulation d'un béton :

La figure suivante (figure II.12) résume les différentes étapes pour la formulation d'un béton :



Figure II.12 : Les différentes étapes d'élaboration d'un béton.

II.8.3. Caractéristiques physiques du béton élaboré :

II.8.3.1. Essai de l'affaissement au cône d'Abrams : [NF EN 12 350-8]

II.8.3.1.1. Définition :

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est un essai réalisé sur le béton de ciment frais peu fluide pour déterminer sa consistance.

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

II.8.3.1.2. Principe de l'essai :

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

II.8.3.1.3. Matériels utilisés :

- Un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut, de 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.

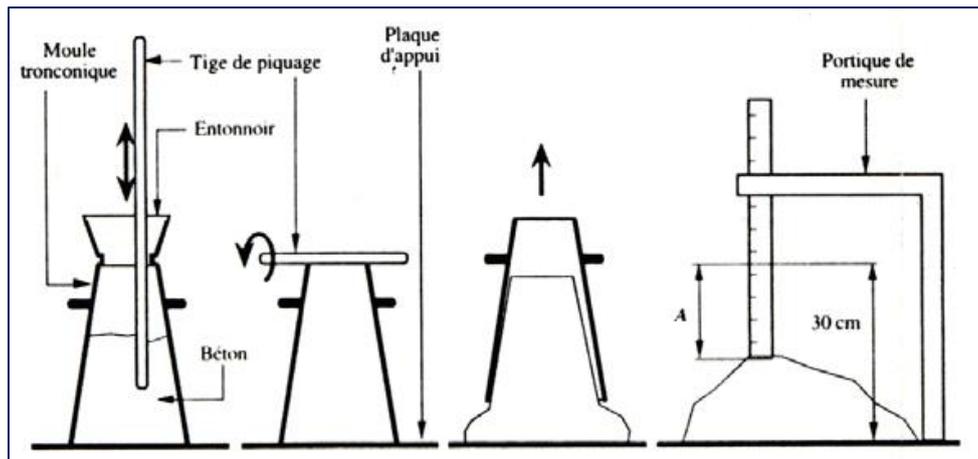


Figure II.13 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

II.8.3.1.4. Conduite de l'essai :

La plaque d'appui est légèrement humidifiée et le moule légèrement huilé y est fixé. 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 (la tige doit pénétrer la couche immédiatement inférieure).

Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur 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_c , 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 II.14 : Cône d'Abrams utilisée.

a) Béton ordinaire (B.O) :



Figure II.15 :
Essai de l'affaissement du B.O avec 250 kg du ciment

Figure II.16 :
Essai de l'affaissement du B.O avec 300 kg du ciment

Figure II.17 :
Essai de l'affaissement du B.O avec 350 kg du ciment

b) Béton adjuvanté :



Figure II.18 :
Essai de l'affaissement du B.Adj avec 250kg du ciment

Figure II.19 : *Essai de l'affaissement du B.Adj avec 300kg du ciment*

Figure II.20 : *Essai de l'affaissement du B.Adj avec 350kg du ciment*

c) Béton avec FC :



Figure II.21 : Essai de l'affaissement du B.FC avec 250kg du ciment

Figure II.22 : Essai de l'affaissement du B.FC avec 300 kg du ciment

Figure II.23 : Essai de l'affaissement du B.FC avec 350 kg du ciment

II.8.3.2 Confection des éprouvettes :

Après coulage du béton, on fait la confection des éprouvettes, on a utilisé pour chaque essai six éprouvettes : trois éprouvettes cylindriques de dimension $(16* 32)$ cm², et trois autres éprouvettes prismatiques de dimensions $(15*15*15)$ cm³.

Ces éprouvettes ont été vibrées à l'aide d'une table vibrante et conservées dans l'eau pendant 28 jours (figure II.24).



Figure II.24 : Confection des éprouvettes.

II.8.3.3. Masse volumique du béton :

Après démoulage, les éprouvettes ont été pesées à l'aide d'une balance afin de calculer la masse volumique à l'état frais.

Après 28 jours de conservation à l'eau, les éprouvettes ont été séchées dans une étuve à 50°C jusqu'à obtenir une masse constante pour calculer les masses à l'état durcis.



Figure II.25 : exemple de masse d'un béton à l'état frais et à l'état durcis.

Les tableaux suivants (tableaux II.20, II.21, II.22) regroupent les valeurs des masses volumiques pour chaque type de béton élaboré.

Tableau II.20 : Masse volumique du B.O.

Masse volumique [kg/m ³]					
C = 250 kg		C = 300 kg		C = 350 kg	
Etat frais	Etat durci	Etat frais	Etat durci	Etat frais	Etat durci
11.41	11.51	11.45	11.54	11.11	11.17

Tableau II.21 : Masse volumique du B.SP.

Masse volumique [kg/m ³]					
C = 250 kg		C = 300 kg		C = 350 kg	
Etat frais	Etat durci	Etat frais	Etat durci	Etat frais	Etat durci
11.40	11.52	11.44	11.57	11.20	11.39

Tableau II.22 : Masse volumique du B.FC.

Masse volumique [kg/m ³]					
C = 250 kg		C = 300 kg		C = 350 kg	
Etat frais	Etat durci	Etat frais	Etat durci	Etat frais	Etat durci
12	12.50	12.30	12.57	11.90	12.10

II.8.4. Caractéristiques mécaniques du B.O, du béton adjuvanté et du béton avec FC:

Après conservation dans l'eau pendant 28 jours, les éprouvettes sont testées mécaniquement avec deux essais différents : un essai destructif (essai de compression) et un essai non destructif (essai au scléromètre et essai à l'ultrason).

II.8.4.1. Essai destructif (essai de compression) :

II.8.4.1.1. Définition, but et principe :

La résistance est la qualité essentielle recherchée pour un béton, afin de déterminer cette dernière, on a mesuré selon la norme **NEP 18-406** la résistance à la compression des éprouvettes à l'aide d'une presse électrique de type CONTROLS, avec une charge maximale de 2000 KN, après 28 jours.

Avant la mise en place des éprouvettes dans l'appareillage, on leur fait subir un polissage afin d'obtenir de bons résultats.

La compression est dite simple et elle est appliquée à l'axe des éprouvettes.

$$F_c = \frac{P [N]}{S [mm^2]}$$

P : la charge maximale en N.

S : la section de l'éprouvette en mm².

II.8.4.1.2. Matériel utilisé :

Cet essai nécessite l'emploi d'une presse.

II.8.4.1.3. Conduite de l'essai :

- Nous avons centré l'éprouvette sur le plateau de la presse ;
- Nous avons appliqué une charge de façon continue (600KN/mn) ;
- Nous avons attendu la rupture de l'éprouvette ;
- Nous avons relevé la valeur indiquée par la presse ;
- Nous avons calculé la résistance à la compression à 28 jours.



Figure II.26 : *Essai de compression.*

II.8.4.2. Essai non destructif :**II.8.4.2.1. Essai au scléromètre :****➤ Définition :**

Le scléromètre est principalement un appareil de contrôle de la dureté d'une surface de béton durci, il convient aux essais en laboratoire comme aux essais sur chantier.



Figure II.27 : *Le scléromètre.*

➤ **But de l'essai :**

Cet essai permet de contrôler les performances mécaniques des bétons et notamment la résistance à la compression, il est conduit selon la norme **NF EN 12504-2**.

➤ **Principe de l'essai :**

Il s'agit de mesurer le rebondissement d'une masselotte projetée violemment par un ressort qui se comprime lors de l'application de l'appareil contre la surface du béton à mesurer.

La hauteur du rebond de cette masselotte est lue sur une échelle graduée : c'est l'indice sclérométrique noté I_s .

Plus la masselotte rebondit haut, plus le béton est résistant.



Figure II.28 : *L'essai au scléromètre.*

➤ **Mode opératoire :**

- Les surfaces de béton testées doivent être brutes ; l'enduit, la peinture ainsi que la couche de laitance et les particules étrangères doivent être éliminées par ponçage ;
- Les zones présentant des nids de gravier, des écaillages, une porosité élevée, des armatures affleurantes doivent être évitées ;
- Pour effectuer la mesure on presse l'appareil contre la surface à tester jusqu'au déclenchement de la percussion de la masselotte sur la tige ;
- Lire directement la valeur indiquée par l'index. Effectuer 3 mesures et on fait la moyenne, la distance entre 2 points de mesure doit être d'au moins 30 mm ;

- L'appareil est étalonné pour fonctionner en position horizontale. Dans le cas d'une utilisation sur des surfaces inclinées, une correction doit être effectuée selon l'abaque ci-après (figure II.29).

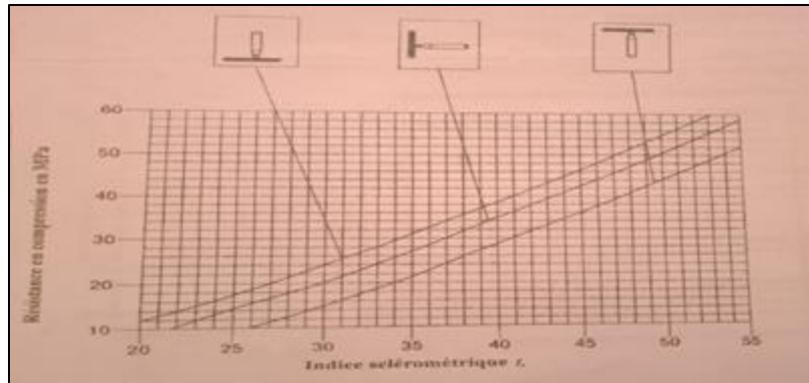


Figure II.29 : Abaque sclérométrique.

II.8.4.2.2. Essai à l'ultrason :

➤ Définition et principe :

L'essai à l'ultrason est un essai non destructif permettant de mesurer la vitesse de propagation du son traversant le béton à l'aide d'un générateur et un récepteur (NF P 18-418)



Figure II.30 : L'essai à l'ultrason.

➤ Matériels utilisés :

Cet essai nécessite d'un ultrason et du gel.

➤ Mode opératoire :

- Nous avons monté les capteurs (émetteur et récepteur) de l'ultrason de part et d'autre des surfaces opposées ;
- Nous avons mis en fonction l'appareil après calibration à 32.3. Par la suite nous avons enregistré le temps affiché par l'ultrason ;
- Nous avons choisis les surfaces les plus lisses et nous avons mis un peu de gel sur les deux surfaces parallèles pour assurer un bon contact entre les

transducteurs et le béton et nous avons relevé par la suite le temps indiqué par l'ultrason ;

- nous avons calculé la vitesse du son dans le béton selon l'équation suivante :

$$V = \frac{D [m]}{T [s]}$$

D : la longueur d'éprouvette (m).

R_c : le temps indiqué par l'ultrason (μs).

On peut mesurer la qualité du béton selon la vitesse (tableau II.23) :

Tableau II.23 : La qualité du béton en fonction de la vitesse du son.

Vitesse du son en m/s	Appréciation de la qualité
>4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	Médiocre
< 2000	Très mauvais

- Enfin, nous avons calculé la résistance non destructive du béton par la formule :

$$R_c = 0.08177 * e^{(0.00147 * V)}$$

V : la vitesse de propagation (m/s).

R_c : la résistance en compression (MPa).

II.9. Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter et caractériser les différents matériaux utilisés dans cette recherche, à savoir les granulats, le ciment, le superplastifiant et les fillers de calcaires.

Même nous avons essayé de démontrer les plusieurs techniques de réalisation des essais physiques et mécaniques. Ces essais ont conduit à une meilleure compréhension de la formulation du béton et les différentes caractéristiques physiques et mécaniques de ce béton.

La discussion détaillée de ces résultats sera traitée au chapitre suivant.

Chapitre III
Résultats expérimentaux et
Discussion

III.1. Introduction :

Ce chapitre est également consacré pour interpréter les résultats obtenus sur le béton ordinaire, béton adjuvanté et béton avec les fillers de calcaires avec différents dosages en ciment, en premier lieu nous avons traité le comportement physique (l'ouvrabilité et la masse volumique) de ces bétons, et en second lieu nous avons traité le comportement mécanique (résistance en compression, essai au scléromètre et essai d'ultrason).

III.2. Les caractéristiques physiques des bétons :

III.2.1. Affaissement au cône d'Abrams :

III.2.1.1. Béton ordinaire :

D'après les résultats obtenus, On remarque que le dosage en ciment égale **C=300kg** présente une maniabilité plus importante par rapport à celui de **C=250kg** et **C=350kg**, et selon le tableau de classification de béton (voir l'annexe) la valeur trouvée pour le dosage **C=300kg** est interviert au béton plastique. Et pour le dosage de **C=350kg** la valeur diminue et on observe un béton ferme, et ça demande l'utilisation d'un adjuvant (superplastifiant) pour améliorer la maniabilité de béton.

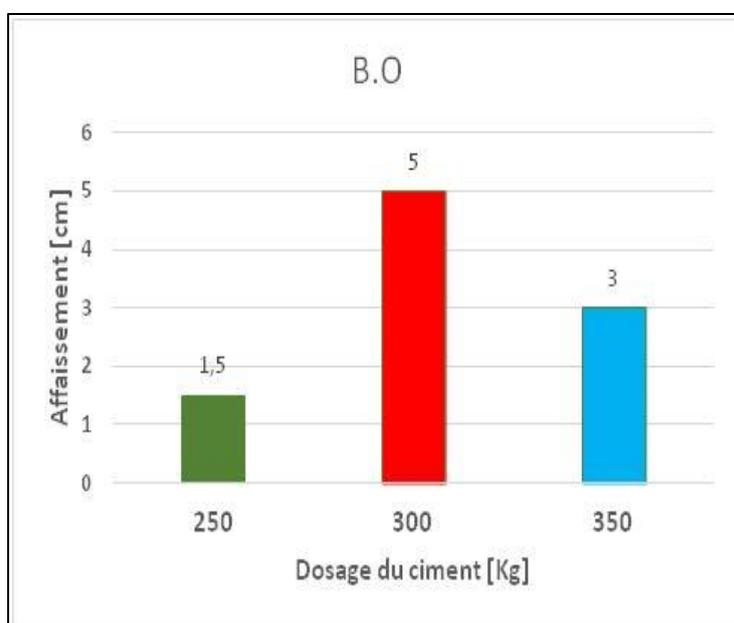


Figure III.1: Affaissement de **B.O** avec différents dosages du ciment.

III.2.1.2. Béton adjuvanté (SP) :

Selon l'essai d'affaissement au cône d'Abrams pour le béton adjuvanté, nous avons observé que plus le dosage en ciment augmente plus la valeur d'affaissement augmente, est cela dû à l'utilisation de Superplastifiant qui rend le béton plus maniable.

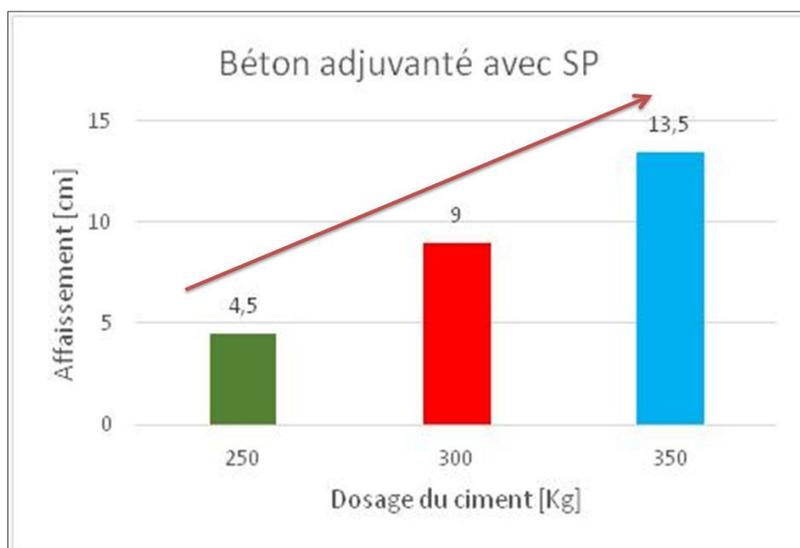


Figure III.2: Affaissement de *B.Adj* avec différents dosages du ciment.

III.2.1.3. Béton avec Fillers de Calcaire (FC):

Selon les résultats obtenus, nous avons enregistré une diminution d'affaissement du béton avec les fillers de calcaires avec un taux de 30% par rapport au béton ordinaire à cause de la diminution d'eau, par ce que les fillers de calcaires absorbent l'eau et rendent le béton moins plastique, mais le dosage du ciment **C=300kg** reste toujours l'optimum.

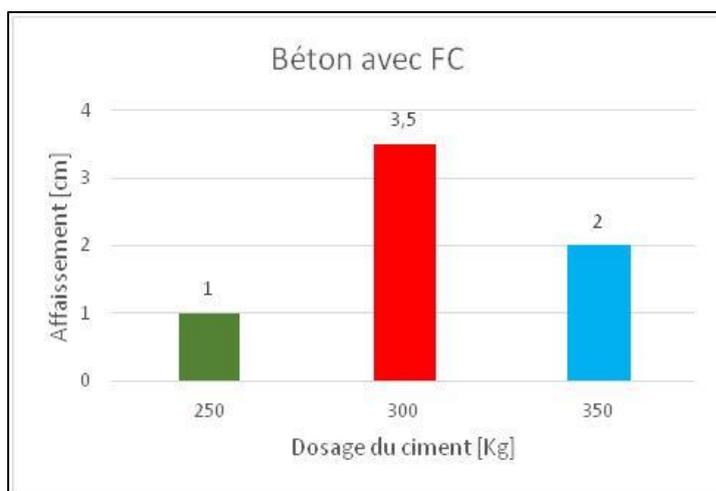


Figure III.3 : Affaissement de *B.FC* avec différents dosages du ciment.

III.2.2. Masse volumique :

III.2.2.1. Béton ordinaire :

Les résultats de la mesure des masses volumiques à l'état frais et à l'état durci du béton ordinaire avec différents dosages en ciment sont illustrés sur la figure III.4.

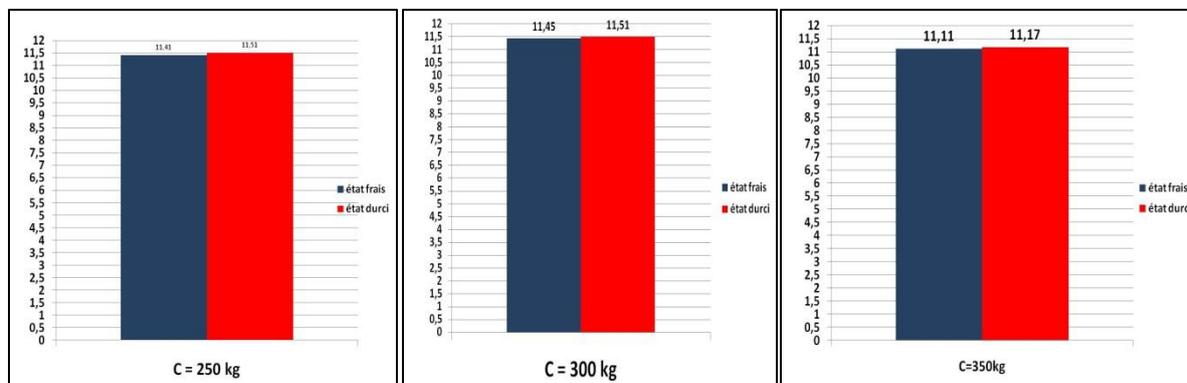


Figure III.4: Masse volumique de B.O avec différents dosages du ciment.

Les résultats montrent que les masses volumiques augmentent à l'état durci pour tous les dosages, et celle du dosage **C= 300 kg** la valeur est maximale, cet optimum observé traduit forcément par une meilleure compacité des mélanges.

III.2.2.2. Béton adjuvanté (SP) :

La figure III.5 présente la masse volumique de béton adjuvanté avec différents dosages en ciment, et nous avons enregistré un accroissement de cette dernière après 28 jours. Et on peut justifier cet accroissement par plus de la formation des hydrates (C-S-H) après cette période à cause de la présence du superplastifiant.

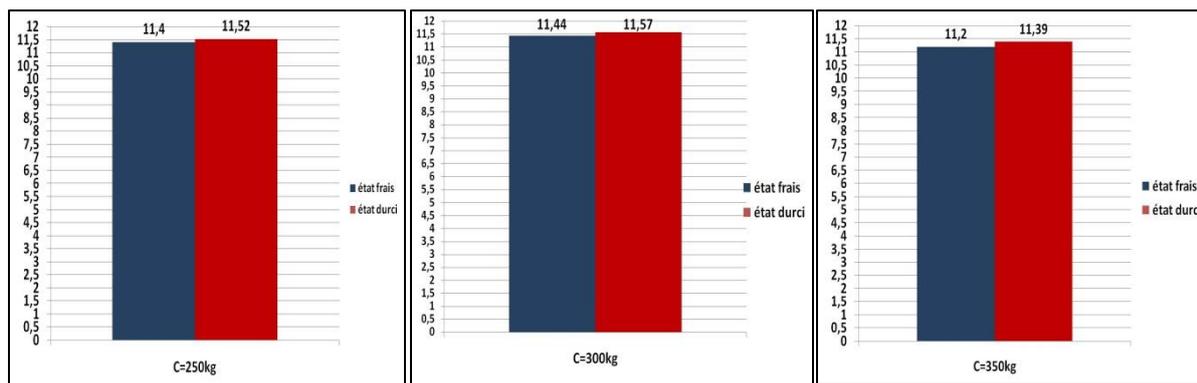


Figure III.5: Masse volumique de *B.Adj* avec différents dosages du ciment.

III.2.2.3. Béton avec Fillers de Calcaire (FC) :

Nous avons remarqué une augmentation de la masse volumique du béton avec fillers de calcaires par rapport à celle du béton ordinaire aux états frais et durci, et cela s'explique par le remplissage des vides par les fines de fillers de calcaire qui rend les bétons plus denses et compacts.

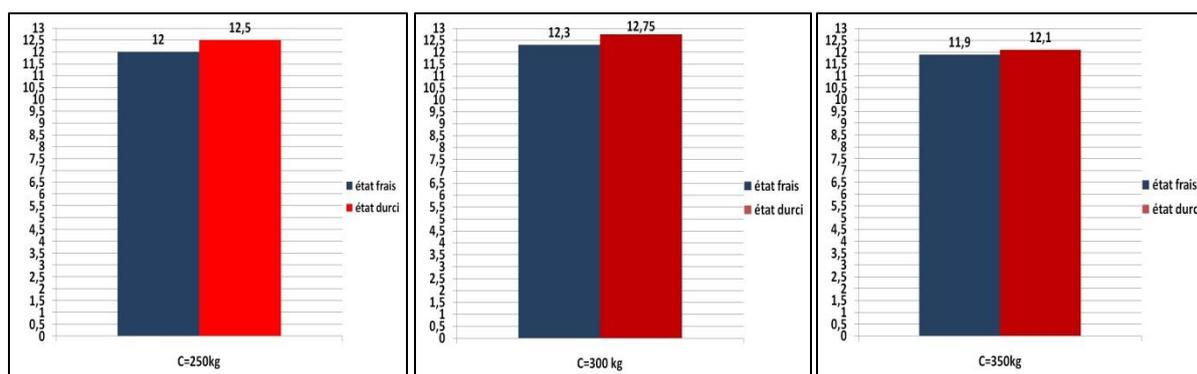


Figure III.6: Masse volumique de *B.FC* avec différents dosages du ciment.

III.3. Les caractéristiques mécaniques des bétons :

Les propriétés mécaniques concernent la déformation d'un matériau soumis à une force.

III.3.1. Essai destructif ; Essai de compression :

L'essai de compression permet de définir les propriétés mécaniques des matériaux.

La courbe contrainte en fonction du dosage en ciment (figure III.7) pour un béton ordinaire et béton adjuvanté montre que le dosage du ciment **C=300kg** présente les meilleures performances mécaniques par rapport au dosage **C=250kg** et **C=350**, par contre le béton avec les fillers de calcaires plus on augmente le dosage en ciment plus les résistances en compression augmentent pour un dosage de fillers fixe égale à **30%**.

Et pour le dosage du ciment $C=350\text{kg}$ au cas du béton adjuvanté nous avons remarqué une chute de la résistance qui est due à l'évaporation d'eau en excès qui favorise l'apparition des vides dans le béton, donc on observe une augmentation de la porosité.

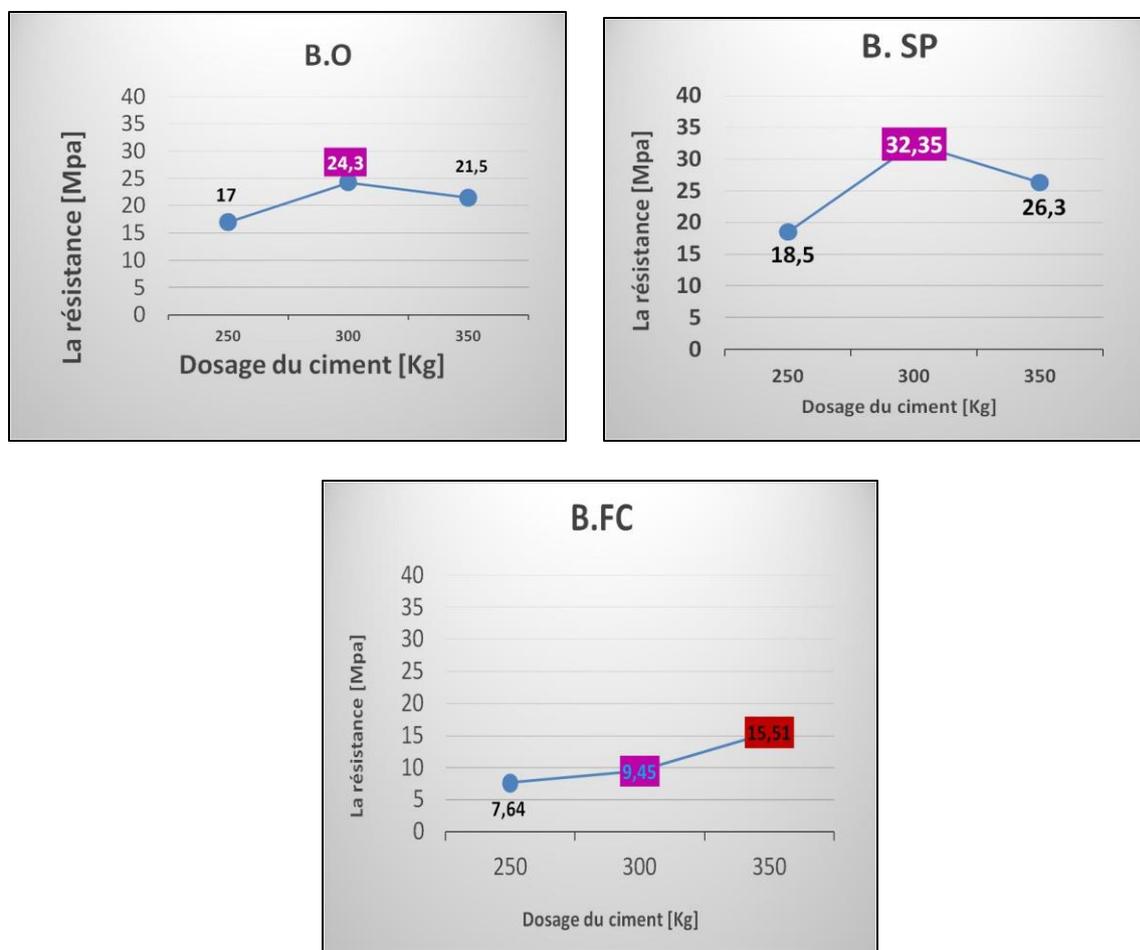


Figure III.7: Résistance en compression des bétons avec différents dosages en ciment.

La figure suivante (figure III.8) illustre les résistances en compression des différents bétons étudiés, et les résultats obtenus montrent que le béton adjuvanté présente les meilleures résistances par rapport aux bétons ordinaires et avec les fillers de calcaire, à cause de la présence de le SP qui permet d'augmenter d'une part la formation des hydrates, et d'autre part, réduire ou éliminer le phénomène de ressuage, la ségrégation et d'autres défauts superficiels pouvant résulter du manque de plasticité du mélange.

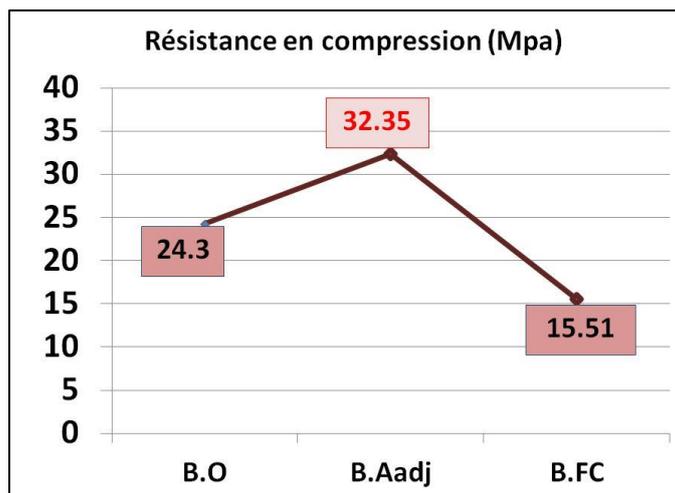


Figure III.8: Résistances en compression des différents bétons étudiés.

III.3.2. Essais non destructifs :

III.3.2.1. Scléromètre :

D'après cet essai, nous avons trouvé que le dosage C=300kg présente les meilleures valeurs par rapport au dosage C=250kg et C=350kg pour le cas du béton ordinaire et le béton adjuvanté, cependant le dosage C=350kg présente la plus grande valeur au cas du béton avec les fillers de calcaire.

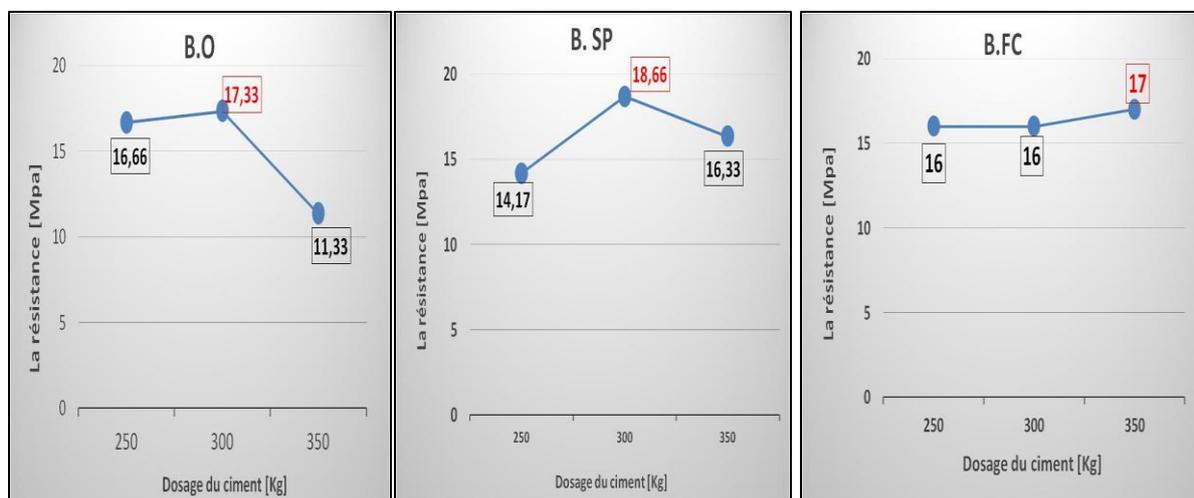


Figure III.9: Résistances en scléromètre des bétons avec différents dosages du ciment.

La figure III.10 illustre la résistance après l'essai de scléromètre des différents bétons étudiés, et les résultats obtenus montrent aussi que le béton adjuvanté présente la résistance la plus importante par rapport aux bétons ordinaire et avec les fillers de calcaire.

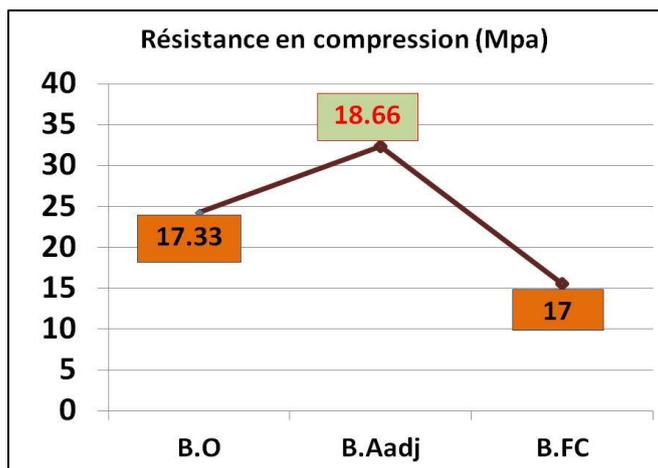


Figure III.10: Résistances en scléromètre des différents bétons étudiés.

III.3.2.2. Ultrason :

L'essai de l'ultrason consiste à calculer d'abord la vitesse de propagation du son traversant le béton, après on calcule la résistance. Selon les résultats obtenus on peut dire que toujours le dosage en ciment **C=300kg** présente les meilleures résistances pour le béton ordinaire et béton adjuvanté et la valeur comprise entre **51Mpa** jusqu'au **61Mpa**, donc nous pouvons classer nos bétons de bon à excellent. Pourtant le béton avec les fillers de calcaire, plus on augmente le dosage du ciment plus la résistance améliore jusqu'à atteindre la valeur de **88.41Mpa**.

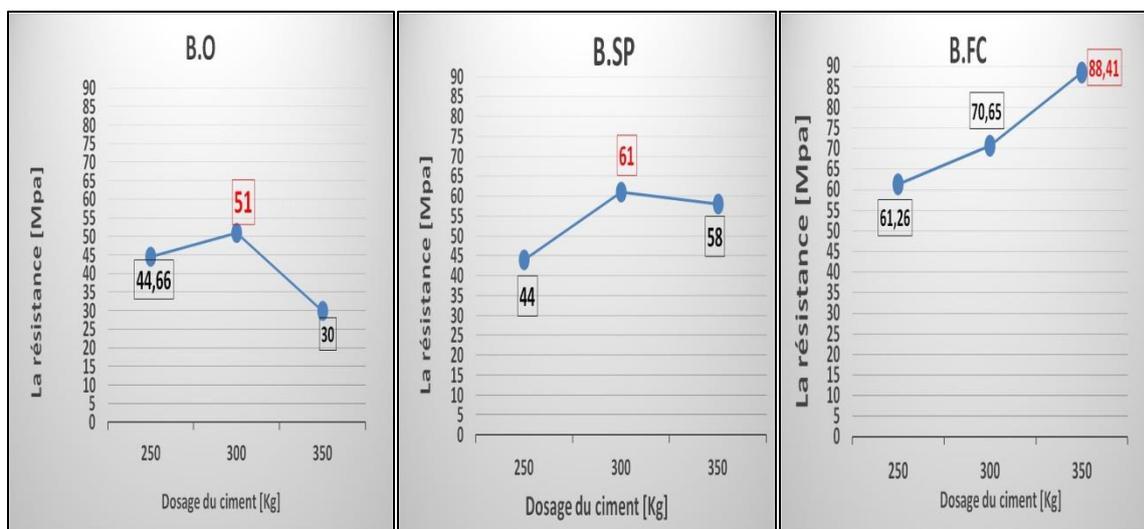


Figure III.11: Résistance à l'ultrason des bétons avec différents dosages du ciment.

Dans ce cas, le béton avec les fillers de calcaire présente la plus importante résistance par rapport aux bétons ordinaire et adjuvanté et cela est dû à l'ajout d'addition au ciment qui augmente la compacité du béton par rapport à une suspension du ciment pour un dosage de 30%, et certains auteurs expliquent l'augmentation de la compacité de mélange par le remplissage des vides.

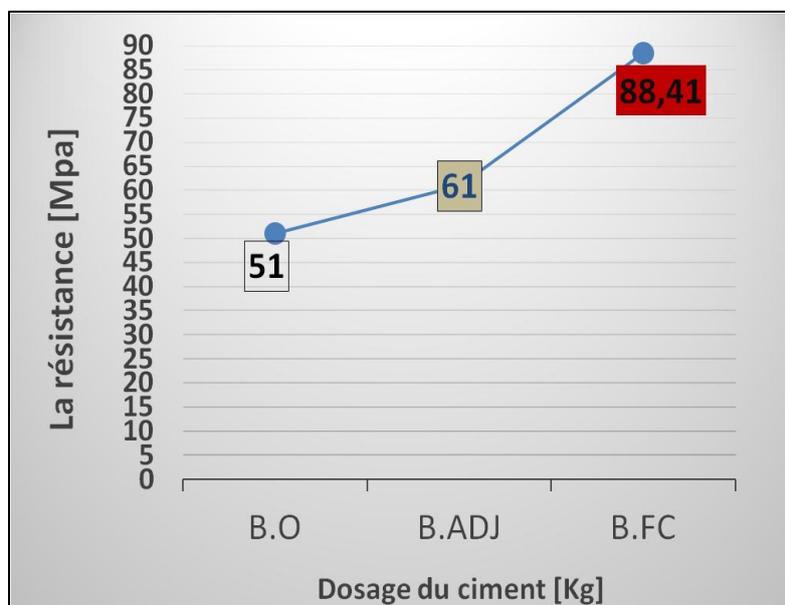


Figure III.12: Résistances à l'ultrason des différents bétons étudiés.

III.4. Conclusion :

Pour n'importe quel type du béton, les différents dosages du ciment (**C=250kg**, **C=300kg** et **C=350kg**) influent sur les caractéristiques physiques et mécaniques, et selon les résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

- Nous avons trouvé que le dosage **C=300kg** est l'optimum pour le cas du béton ordinaire et le béton avec les fillers de calcaire.
- Pour le béton adjuvanté, plus le dosage en ciment augmente plus l'affaissement augmente.
- Concernant la masse volumique, on a enregistré une amélioration des masses de tous les bétons étudiés à l'état durci.
- La résistance à la compression du béton adjuvanté est plus importante que celle du béton ordinaire et béton avec les fillers de calcaire.
- Selon l'essai d'ultrason, le béton avec les fillers de calcaire est plus résistant et nous pouvons le classer comme excellent.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les travaux présentés dans cette étude s'inscrivent dans l'objectif général d'étudier le comportement physico-mécanique du béton avec différents dosages du ciment.

Le béton ordinaire a fait ses preuves au domaine de la construction, mais on cherche toujours le meilleur, pour cet objectif nous avons essayé d'améliorer le comportement physico-mécanique de ce dernier par l'utilisation d'un adjuvant (superplastifiant), et une addition minérale (les fillers de calcaire) avec un pourcentage fixe de chaque (**SP=1.8%, FC=30%**).

L'incorporation du superplastifiant au béton modifie de manière significative les propriétés à l'état frais (l'ouvrabilité) et à l'état durci (résistance mécanique).

L'utilisation de l'adjuvant (**SP**) dans le béton avec différents dosages du ciment rend le béton plus maniable. Pourtant nous avons enregistré une diminution de la résistance en compression avec l'augmentation du dosage du ciment grâce à la présence d'eau (un excès d'eau).

L'utilisation du filler de calcaire rend le béton plus compact, mais nous avons remarqué une chute de la résistance par augmentation du dosage.

A la fin, notre étude nous a permis de conclure que le béton adjuvanté (**SP**) donne les meilleures performances mécaniques par rapport aux autres bétons mais avec un dosage du ciment de **C=300kg**.

*Références
Bibliographiques*

Références Bibliographiques :

- [1] : AMRANE Anis, HADDAD HAYET ., *Etude de l'influence de la margine d'olive sur les caractéristiques physico-mécanique du béton, mémoire de fin d'étude*, Université de Bejaia, 2015-2016.
- [2] : [Djamila Boukhelkhal, Saïd Kenai., *Détermination non destructive de la résistance du béton sur site (Scléromètre & Ultrason). Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Bayonne, France <hal-01167739>, May 2015].
- [3] : Djebali Saïd., *Caractérisation des éléments de structures en béton de fibres métalliques, thèse de doctorat*, Université de Tizi-ouzou, 2013.
- [4] : *Les bétons : formulation, fabrication en mise en œuvre, G11 fiches techniques (tome 2), Cimbéton*, page 135.
- [5] : *Les bétons : formulation, fabrication en mise en œuvre, G11 fiches techniques (tome 2), Cimbéton*, page 135.
- [6] : *Granulats, ouvrage collectif*, Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 1990.
- [7] : Approuvé par le Gouvernement wallon., *Matériaux et produits de construction, Cahier des charges type qualiroutes, chapitre C*, 20 juillet 2011.
- [8] : Smeaton., *la découverte du béton*, 1756.
- [9] : Ahmed Gmira., *Etude structurale et thermodynamique d'hydrates modèle du ciment, Material chemistry*, Université d'Orléans, French. <tel-00006001>, 2003.
- [10] : Jean-Pierre Ollivier et Angélique Vichot., *La durabilité des bétons*, Presses de l'école des ponts et chaussées, Paris 2008.
- [11] : Dr. Ir. P. Boeraeve., *Cours de Béton armé*, 2011.
- [12] : Dr Hadj Sadok, A., *Le ciment Portland, chapitre II*, 2011.
- [13] : Ciments et bétons, Collection Technique CIMbéton G11, Amprincipe Paris, Edition 2005.
- [14] : Les différents types de ciment, Lafarge algérie-ciment, 2007.
- [15] : Lucien Pliskin., *Le béton, livre*, Paris, 1907.
- [16] : S. Jean Hamilius, s. René Konen., *Clauses Techniques Bétons C.T. 7/75*, Luxembourg, 1975, 1980.
- [17] : *Les adjuvants : Définition opportunités d'utilisation, journée d'information*, 2004.
- [18] : Nathalie Otis., *Influence de divers superplastifiants sur le ressuage et l'interface pâte/granulats dans les matériaux cimentières, mémoire*, Université de Sherbrooke. Québec, Canada, mai 2000.
- [19] : Tebbal N et Z. Rahmouni., *étude paramétrique de l'effet du dosage en superplastifiant sur la performance d'un béton à haute performance*, INVACO2 ,10-275, novembre 2011.

- [20] : S-Lalji., *Caractéristiques fondamentales du béton*, Cours-ETS, hiver 2015.
- [21] : Mhamed Adjoudj., *Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton Mécanique des matériaux [physics.class-ph]*. Université de Cergy Pontoise, Français, NNT : <2015CERG0784>, 2015.
- [22] : Anissa Bessa-Badreddine., *Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers*, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2004.
- [23] : Hermann, Kurt., *Les ajouts : les fillers*, article, 1995.
- [24] : Paco Diederich., *Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2010.

LES NORMES :

[NF XP18-545] : (10 septembre 2011) Granulats – définition, conformité, spécification (indice de classement P18-545).

[XP P18-540] : AFNOR, (octobre 1997) Granulats – définition, conformité, spécification (indice de classement P18-540).

[NBN B 11-011] : (1981) Qualité – construction – spécifications techniques sable pour travaux de construction.

[EN-197-1] : (2000) Ciment - partie 1: composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

[NF EN 196-1] : (avril 2006) Méthodes d'essai des ciments - partie 1 : détermination des résistances mécaniques.

[NF P 15-319] : (2006) Liants hydrauliques – Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.

[NF P 15-317] : (2006) Liants hydrauliques – Ciments pour travaux à la mer.

[NF EN 934-2] : (11 août 2012) Les définitions et les exigences pour les adjuvants utilisés dans les bétons.

[EN 206-1 (NF P 18-325)] : (février 2002) Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité.

[NF P 18-406] : Norme de l'essai de compression

[SIA 215.002] : (2011) Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

[ENV 197-1] : (avril 2012) Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

[NF P 18-308] : Norme des additions calcaires.

[EN 206-1] : (Avril 2004) Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité.

[NF P 18-509] : (Septembre 2012) Additions pour béton hydraulique – Additions siliceuses – Spécifications et Critères de conformité (Indice de classement : P18-509).

[NF P 18-506] : (Mars 1992) Additions pour béton hydraulique - Laitier vitrifié moulu de haut-fourneau - (Sera remplacée ultérieurement par les normes NF EN 15167-1 et NF EN 15167-2, à paraître) : P 18-506.

[NF P 18-501] : (Mars 1992) sur les fillers.

[NF P18-504] : (Juin 1990) Béton – Mise en œuvre des bétons de structure (Indice de classement : P18-504).

[NF P 78-502] : (Mars 2005) Protecteurs individuels contre le bruit – Recommandations relatives à la sélection, à l'utilisation, aux précautions d'emploi et à l'entretien – Document guide S 78-502.

[NF P 18-505] : (Novembre 2013) Travaux sous tension sur les installations électriques basse tension - Mesures de prévention mises en œuvre - Partie 1 : prescriptions générales.

[EN 197-1] : (février 2001) Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

[SIA 215.002] : (2000) Ciment - Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. SN EN 197-1. Numéro de produit. *SIA 215.002*.

[ENV 197-1] : (Avril 2012) Ciment - Partie 1 : composition, spécifications (EUROPAEISCHE VORNORM *ENV 197-1*).

[NF X 11-504] : (Décembre 1992) Elle s'applique uniquement aux tissus métalliques montés dans les tamis de contrôle dont les dimensions nominales des ouvertures.

[NF EN 933-1] : (Mai 2012) Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats.

NA 442 : (Décembre 2008) Composition spécifications et critères de conformité des ciments courants.

[NF P 18-418] : Essai d'auscultation sonique, Contrôle non destructif des bétons mortiers etc.,

[NFP 18-559] : (Juin 1992) Granulats mesure de la masse volumique.

[NF EN 12 350-8] : (Janvier 2011) Essai d'étalement au cône d'Abrams.

[NF EN 12 350] : (20 Janvier) Essai sur béton durci.

[NF EN 12 504-2] : (20 Janvier 2011) .

[NF EN 933-8] : (Mars 2012) Essai pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats.

[EN 196-3] : (Aout 1995) Méthodes d'essais des ciments.

[NF EN 1097-6] : (Février 2006) Essai pour déterminer les caractéristiques mécanique et physiques des granulats.

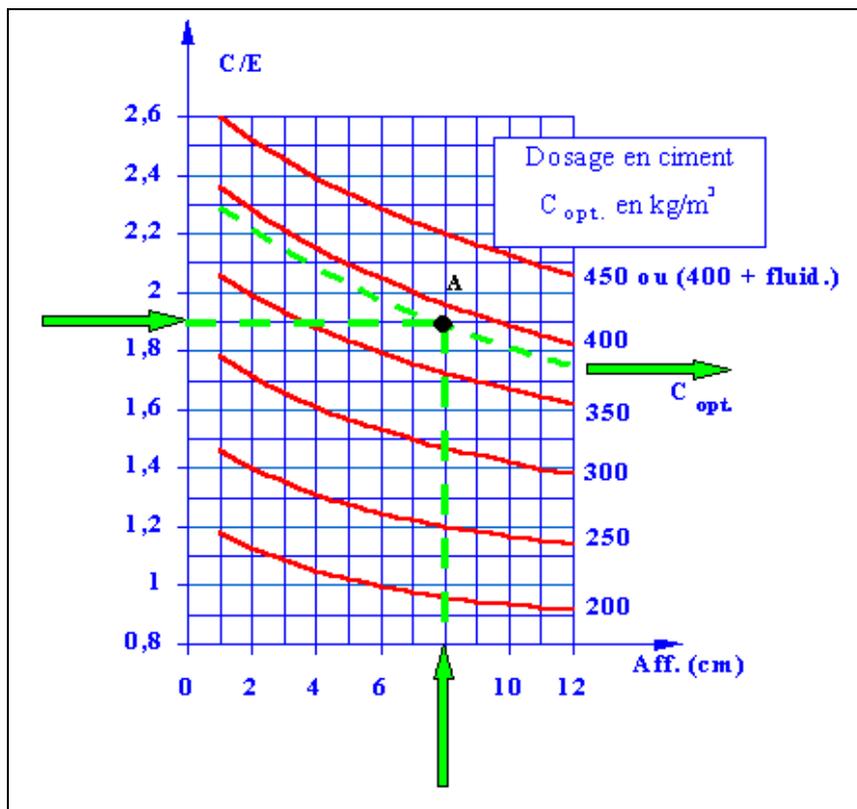
ANNEXE

ANNEXE II :

Annexe II.1 : Tableau qui donne quelques valeurs souhaitables de l'équivalent de sable.

N°	Equivalent de sable visuel en %	observations
01	ESV < 65 ESP < 60	Sable argileux ; risque de retrait ou de gonflement de béton
02	65 < ESV < 75 60 < ESP < 70	Sable légèrement argileux ; de propreté admissible.
03	75 < ESV < 85 70 < ESP < 80	Sable propre, convenant au béton à haute qualité.
04	ESV > 85 ESP > 80	Sable très propre ; absence de plasticité de béton.

Annexe II.2 : Abaque du rapport C/E en fonction de l'affaissement.



Annexe II.3 : Valeurs de correcteur K en fonction du type de vibration et dosage en ciment.

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Format des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage ciment	400+f	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Annexe II.4 : Valeurs de γ en fonction du diamètre des granulats.

Coefficient de compacité :								
Consistance	Serrage	Coefficient γ en fonction du diamètre D des granulats						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Annexe II.5 : Fiche technique du «SP 40 ».

NOTICE TECHNIQUE 1 3 6

MEDAPLAST SP 40

Superplastifiant - haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le MEDAPLAST SP 40 est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons extrudés
- Bétons BCR

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST SP 40 permet :

Sur béton frais :

- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Blanc
- pH 8,2
- Densité 1,20 ± 0,01
- Teneur en cations < 1g/L
- Etréat sec 40%

MODE D'EMPLOI

Le MEDAPLAST SP 40 est introduit dans l'eau de gâchage. Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée : 0,5% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L pour 100 kg de ciment. Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le MEDAPLAST SP 40 est conditionné en bidons de 12Kg, fûts de 270 kg et cubitainers de 1200 kg. Délai de conservation : Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 36°C).

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse. Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitec-ib.com. PV d'essai conforme aux normes, établi par le CNERB en Janvier 2007.

Evolution des résistances en compression

Age (jours)	Béton dosé à 1.1% de MEDAPLAST SP40	Béton témoin
0	0	0
1	~15	~10
7	~30	~18
28	~40	~25

Les arrangements décrits dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience. Il est recommandé de procéder à des essais de référence pour déterminer la stabilité d'utilisation dans les conditions réelles de chantier.

Granitec Zone Industrielle Oued Smer - BP65 Oued Smer - 16270 Alger
 Tél : 021 31 021 51 46 81 & 82
 Fax : 021 31 021 51 64 22 & 021 31 43 23
www.granitec-ib.com - Email : granitec@granitec-ib.com

ANNEXE III :**Annexe III.1 : Tableau de classes d'affaissement.**

Affaissement (en cm)	Classe des bétons
1 à 4	Ferme
5 à 9	Plastique
10 à 15	Très plastique
≥ 16	Fluide

Résumé :

Le béton est le deuxième matériau le plus utilisé par l'homme après l'eau. Il est donc essentiel de toujours progresser dans l'utilisation de ce matériau afin de faciliter au maximum son utilisation de ses performances tout en minimisant son impact environnement et son coût.

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier le comportement physico-mécanique d'un béton ordinaire avec différents dosages en ciment, et pour améliorer les performances de ce dernier, on a utilisé un adjuvant avec un pourcentage fixe et on a introduit aussi les fillers de calcaire.

Abstract :

Concrete is the second most used material by humans after water. It is therefore essential to always make progress in the use of this material in order to facilitate as much as possible its use of its performances while minimizing its environmental impact and its cost.

The main objective of this thesis is to study the physico-mechanical behavior of an ordinary concrete with different dosages of cement and to improve the performance of the cement, an adjuvant was used with a fixed percentage and the limestone fillers were also introduced.