

A page de garde.pdf
Résumé.pdf
Dédicaces.pdf
Sommaire BHP.pdf
Liste des figures BHP.pdf
Liste des tableaux BHP.pdf
Inter-page_Introduction générale.pdf
Introduction générale.pdf
PARTIE I.pdf
Page_Chapitre I.pdf
chapitre I. BHP.pdf
Page_Chapitre II.pdf
chapitre II. Add.minérales.pdf
Page_Chapitre III.pdf
chapitre III. Fillers calcaires.pdf
Page_Chapitre IV.pdf
Chapitre IV-formulation.pdf
Page_Chapitre V.pdf
Chapitre V-étude expérimentale.pdf
Page_Chapitre VI.pdf
Chapitre VI-résultats.pdf
Inter-page_Conclusions générales et perspectives.pdf
Conclusion générale et perspectives.pdf
Annexes.pdf
Annexe I.pdf
Annexe II.pdf
Annexe III.pdf
Annexe IV.pdf
Annexe V.pdf
Annexe VI.pdf
pge_Références bibliographiques.pdf
Bibliographie.pdf



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Génie de la construction

Présenté par :

CHAIB Sara

SEGHIER Imen

Sujet du mémoire

ETUDE EXPÉRIMENTALE DU
COMPORTEMENT MÉCANIQUE D'UN BÉTON
À HAUTES PERFORMANCES À BASE DE
FILLERS CALCAIRES

Soutenu publiquement le **18/06/2017** devant le jury composé de :

M. SERBAH.H

Président

Mme. RENNAK.Z

Rapporteur

Mme. DRAOUI.A

Examineur

M. KERROUM.N

Examineur

PROMOTION : 2016/2017

ملخص

العمل المنجز في إطار مذكرة نهاية الدراسة تركز على دراسة تجريبية على السلوك الميكانيكي لخرسانة عالية الأداء مصنوعة من غبار الحجر الجيري. تهدف هذه الدراسة الى الحصول على خرسانة عالية الأداء باستخدام المواد المحلية المتاحة. في الواقع الخرسانة عالية الأداء (BHP) هي خرسانة تتميز بمقاومة ضغط عالية تزيد عن 50 ميجا بسكال في 28 يوم، خواص ميكانيكية عالية في الأعمار المبكرة والمتأخرة. البحث عن الأداء العالي للخرسانة يكون من خلال الحد من مسامية حجم الجزيئات (نسبة الفراغات)، فمن الضروري لتحسين أدائها تقليل هذه المسامية، إما عن طريق حجم الجسيمات وذلك بإضافة مواد اسمنتية مكملية، أو عن طريق إضافة ملدنات عالية الأداء، أو معا في كثير من الأحيان. هذا العمل التجريبي يدرس استبدال جزئي للإسمنت مع إضافة مادة اسمنتية مكملية (غبار الحجر الجيري) بنسبة 10 % في الخرسانة وإضافة ملدن عالي الأداء (تقليل ماء الخلط) (1.5% وزن الاسمنت)، كما يدرس تأثير هذه المواد الاسمنتية والإضافات الكيميائية على السلوك الكيميائي للخرسانة. بعد تقديم اختبارات ملموسة على الخرسانة لتقييم اثنين من صفاتها الجوهرية (الانسيابية والمقاومة)، بينت النتائج المتحصل عليها أن الخرسانة التي تتكون أساسا من مواد معدنية، توفر خواص عالية.

الكلمات الدالة: خرسانة عالية الأداء، غبار الحجر الجيري، ملدن عالي الأداء (مخفض ماء الخلط)، الانسيابية، المقاومة.

Résumé

Ce travail réalisé dans le cadre du mémoire de fin d'étude a porté sur l'**Etude expérimentale du comportement mécanique d'un béton à hautes performances à base des fillers calcaires**. Cette étude a pour objectif de formuler un béton à haute performance à partir des matériaux disponibles localement. En effet, un béton à hautes performances (BHP) est un béton caractérisé par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 50 MPa à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais, à court ou à long terme. La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. Pour améliorer ses performances, il convient d'en diminuer cette porosité, soit en agissant sur la granulométrie en ajoutant des particules ultrafines, soit en ajoutant un adjuvant de type super plastifiant, soit le plus fréquemment les deux.

Ce travail expérimental étudie la substitution partielle du ciment par une addition minérales (filler calcaire) dans le béton avec un pourcentage de (10%), en ajoutant un superplastifiant haut réducteur d'eau (1.5 du poids de ciment) et l'effet de ces produits sur le comportement mécanique de béton.

Après avoir soumis le béton à des essais pour évaluer ses deux qualités essentielles (l'ouvrabilité et la résistance), les résultats obtenus montrent que le béton, composé essentiellement de constituants minéraux, offre des bonnes qualités.

Mots clés : BHP, fillers calcaires, superplastifiant/ haut réducteur d'eau, ouvrabilité, résistance.

Abstract

This work realized within the framework of the report of the end of study concerned the **experimental Study of the mechanical behavior of a high-performance concrete with the calcareous fillers**. This study has for objective to formulate a high-performance concrete from the available materials locally. Indeed, a high-performance concrete (BHP) is a concrete characterized by a very strong compressive strength, because this one is superior to 50 MPa in 28 days, and exceptional properties in the fresh state, to short or long-term. The research for the high performances passes by the reduction of the porosity of the concrete that is its percentage of air-void. To improve its performances, the porosity should be reduced, either by acting on the grain size by adding ultrafine particles that is by adding an additive of superplasticizer great type, or most frequently both of them.

This experimental work studies the partial substitution of the cement by an addition mineral (filler limestone) in the concrete with a percentage of (10 %), by adding a reducing high superplasticizer of water (1.5 of the weight of cement) and the effect of these products on the mechanical concrete behavior.

After subjecting the concrete to testing to estimate its two essential qualities (the slump and the strength), the obtained results show that the concrete consisted essentially of mineral constituents, offers good qualities.

Keywords: BHP, filler limestone, superplasticizer / high reducer of water, slump, strength.

Remerciements

Tout d'abord, le grand Merci à notre « DIEU » le tout puissant, qui nous a donné la force et la volonté pour finir ce travail.

Nous remercions nos parents dont le rêve a toujours été de nous voir réussir, qu'ils sachent que leur place est dans nos cœurs.

Nous remercions tout particulièrement madame RANNAK.Z pour avoir accepté de nous encadrer et de nous suivre tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions aussi tous les enseignants de notre département de Génie civil de l'Université de Tiaret pour les efforts qu'il ne cesse de déployer afin d'assurer le développement et l'épanouissement de la formation.

Nous remercions aussi nos collègues de promotion MasterII.

Sans oublier tous les membres de nos familles : SGHIER , CHAIB

En fin nous remercions tous ceux qui de loin ou de près, ont apporté une gracieuse collaboration pour la confection de ce travail.

Dédicace

Pour que ma réussite soit complète je la partage avec toutes les personnes que j'aime, je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère, qui m'a tant aidé avec son soutien, elle est ma source de courage et de patience à qui j'exprime toute ma reconnaissance.

Mon très cher père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis.

Mes très chers frères : Salah Edin, Abou Bakr

Mes chères sœurs : Hind , Ahlem, Nour Elhoda

Mes chères amies sœurs : L.Sarah, B.Kheira, A.Sarah, Fatima.

Seghier Imen

À la mémoire de ma grand-mère HADJA ALIA

À mes parents

À mes sœurs et mes frères

À toute ma famille

Sara ASL[∞]

Résumé	
Abstract	
الملخص	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	

Première partie -Synthèse Bibliographique

Chapitre I : Les bétons à hautes performances

I.1 Introduction	1
I.2 Définition des BHP	2
I.3 Composition des BHP	3
I.3.1 Le ciment	4
I.3.2 Les granulats	5
I.3.3 Additions minérales	6
I.3.4 Eau	7
I.3.4.1 Influence du rapport E/L	7
I.3.5 Adjuvants superplastifiants	8
I.4 Microstructure des BHP	9
I.4.1 Composition et hydratation d'un ciment portland	10
I.4.2 Principaux hydrates de la pâte de ciment durcie	12
I.4.2.1 Silicate de calcium hydraté C-S-H	12
I.4.2.2 Portlandite	12
I.4.2.3 AFt et AFm	12
I.4.3 Particularité de l'hydratation des BHP	12
I.4.4 Porosité de la pâte de ciment	13

I.4.5 Influence de l'auréole de transition	13
I.5 Les voies d'obtention des hautes performances	15
I.5.1 Défloculation des grains de ciments et réduction de la teneur en eau	15
I.5.2 Optimisation du squelette et de l'empilement granulaire	15
I.6 Propriétés physico-chimiques et mécaniques des BHP	16
I.6.1 La résistance à la compression / et à la traction	17
I.6.2 Module d'élasticité	18
I.6.3 Retrait	18
I.6.4 Fluage	20
I.6.5 Durabilité	20
I.6.6 Résistance au feu	21
I.6.7 Résistance aux agents agressifs	21
I.6.8 Tenue aux attaques gel / dégel	21
I.6.9 Carbonatation	21
I.6.10 Adhérence acier-béton	22
I.6.11 Réductions des flèches et des déformations des structures	22
I.6.12 Propriétés thermiques	22
I.7 Principaux domaines d'applications	22
I.7.1 Structures coulées en place	23
I.7.2 Produits préfabriqués en béton	23
I.8 Réalité des BHP	24
I.8.1 Les ouvrages d'art	25
I.8.2 le bâtiment	27
I.9 Les BHP en Algérie	29
I.10 Conclusion	31

Chapitre II : Les additions minérales

II.1 Introduction	33
II.2 Définitions des additions	35
II.3 Classifications des additions minérales	35
II.3.1 Les pouzzolanes	36
II.3.1.1 Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes	37
II.3.1.2 Effets des pouzzolanes sur le béton	38

II.3.2 Les cendres volantes	39
II.3.2.1 Effets des cendres volantes sur les caractéristiques du béton.....	40
II.3.3 Les laitiers de haut fourneau	42
II.3.3.1 Effets sur les caractéristiques des bétons	43
II.3.4 Les fumées de silice	44
II.3.4.1 Effets sur les propriétés du béton	46
II.3.5 Les fillers calcaires	47
II.3.5.1 Effets des fillers calcaires sur le béton	48
II.4 Actions des additions minérales sur les matériaux cimentaires	49
II.4.1 Effet granulaire	49
II.4.2 Effet physico-chimique et microstructural	51
II.4.3 Effet chimique	51
II.5 L'intérêt de l'utilisation des produits minéraux dans le génie civil	51
II.5.1 Intérêt du point de vue économique	51
II.5.2 Intérêt du point de vue technique	52
II.6 L'utilisation des matériaux minéraux en Algérie	52
II.7 Conclusion	54

Chapitre III : Les fillers calcaires

III.1 Introduction	56
III.2 Définition du filler calcaire en tant qu'addition minérale	57
III.3 Le concept du coefficient K : applicable aux fillers calcaires	58
III.4 La problématique de la demande en eau	59
III.5 Les fillers calcaires dans les ciments	59
III.6 Les fillers calcaires dans les bétons	60
III.7 Influence des fillers calcaires sur les propriétés des bétons	61
III.7.1 Caractéristiques du filler calcaire influençant les propriétés des bétons	61
III.7.1.1 A l'état frais	61
III.7.1.2 A l'état durci	63
III.8 Conclusion	68

Chapitre IV : Formulation des bétons courants et bétons HP

IV.1 Introduction.....	70
IV.2 Les caractéristiques recherchées pour un béton.....	72
IV.2.1 Le béton frais.....	72
IV.2.2 Le béton durci.....	73
IV.2.2.1 La porosité.....	73
IV.2.2.2 Les résistances mécaniques.....	74
IV.2.2.3 La durabilité.....	75
IV.3 Comment déterminer la composition du béton ?.....	75
IV.4 L'approche de la formulation.....	76
IV.4.1 Dosage en ciment.....	76
IV.4.2 Dosage en eau.....	76
IV.4.3 Choix des granulats.....	77
IV.4.4 Choix et dosage des adjuvants.....	77
IV.5 Différentes méthodes de formulation des bétons.....	78
IV.5.1 Méthode à granularité continue de Bolomey.....	78
IV.5.2 Méthode de Vallette à caractère expérimental.....	79
IV.5.3 Méthode d'Abrams.....	80
IV.5.4 Méthode de Faury.....	81
IV.5.5 Méthode de Joisel.....	84
IV.5.6 Une méthode pratique de composition : les abaques de G. Dreux.....	84
IV.6 Formulation des bétons à hautes performances.....	86
IV.6.1 Méthode de formulation de BHP.....	87
IV.7 conclusion.....	88

Deuxième partie – Etude expérimentale

Chapitre V : Matériaux, matériels et essais

V.1 Introduction	90
V.2 Matériaux utilisés	91
V.2.1 Ciment	91
V.2.2 Granulats	92
V.2.3 Addition minérale	92
V.2.4 l'eau de gâchage	93
V.2.5 Adjuvant.....	93
V.3 Caractérisation des matériaux	94
V.3.1 Caractéristiques applicables aux graviers (3/8 et 8/15)	94
V.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage (EN 933-1)	94
V.3.1.2 Propreté superficielle	99
V.3.1.3 Mesure du coefficient d'aplatissement	102
V.3.1.4 La masse volumique du gravier (3/8, 8/15)	106
V.3.1.5 Essai « Los-Angeles »	110
V.3.1.6 Détermination des carbonates dans les graviers (3/8,8/15)	114
V.3.2 Caractéristiques applicables aux sables	118
V.3.2.1 Analyse granulométrique par tamisage	118
V.3.2.2 Module de finesse du sable (EN 12620)	120
V.3.2.3 Propreté du sable (équivalent du sable) [NF P18-598]	121
V.3.2.4 Essai au bleu de méthylène « méthode à la tache »	127
V.3.2.5 Masse volumique du sable	131
V.4 Formulation des bétons	134
V.4.1 Formulation du béton ordinaire	134
V.4.2 Formulation du BHP	137
V.5 Confection des bétons et conservation des éprouvettes	138
V.5.1 Malaxage du béton	138
V.5.2 Remplissage des moules et le mode de mise en place	140
V.5.3 Conservation des éprouvettes	141

V.5.3.1 Conservation avant démoulage	141
V.5.3.2 Conservation après démoulage	141
V.6 Caractérisation du béton à l'état durci	142
V.6.1 Résistance en compression	142
V.6.2 Résistance en traction par fendage	143
V.7 Conclusion	144

Chapitre VI : Présentation et analyse des résultats

VI.1 Introduction	146
VI.2 Analyse des résultats de caractérisation	146
VI.2.1 A l'état frais	146
VI.2.2 A l'état durci	147
VI.2.2.1 Résistance en compression	147
VI.2.2.2 Résistance en traction par fendage	150
VI.2.2.3 Module d'élasticité	152
VI.3 Comparaison des résultats avec ceux des années précédentes	153
VI.4 Conclusion	155

Conclusions générales et perspectives

Annexes

Bibliographie

Liste des figures

Chapitre I

Figure (I.1)	comparaison entre Béton courant et Béton à haute performance BHP (microstructure)	03
Figure (I.2)	Structure poreuse d'une pâte de ciment de type CEM I et de la pâte d'un mortier confectionné avec le même ciment	14
Figure (I.3)	Evolution du retrait endogène en fonction du rapport E/C	19
Figure (I.4)	pont de l'Iroise	25
Figure (I.5)	pont Rion-Antirion	25
Figure (I.6)	Pont de l'île Rousski	26
Figure (I.7)	Pont de Normandie	26
Figure (I.8)	Arche de la Défense (France)	27
Figure (I.9)	Burj Khalifa	27
Figure (I.10)	Aéroport international de Rabat-Salé (Maroc)	28
Figure (I.11)	North Galaxy Towers (Belgique)	28

Chapitre II

Figure (II.1)	Pouzzolane naturelle	36
Figure (II.2)	Pouzzolane artificielle	37
Figure (II.3)	Fumée de silice sous forme poudre	44
Figure (II.4)	Effet filler de la fumée de silice	46

Figure (II.5)	Amélioration de la consistance d'un béton en fonction du % de fumée de silice ajoutée pour différentes valeurs du rapport E/L	50
Figure (II.6)	Développement de la résistance à la compression de béton contenant des ajouts	54

Chapitre III

Figure (III.1)	Illustration de l'effet filler	57
Figure (III.2)	Relation entre la demande en eau d'un filler et sa surface spécifique	62
Figure (III.3)	Perte d'étalement par rapport au mortier de référence (0% de filler) en fonction de la teneur en argiles des fillers (35% de filler en masse de ciment)	63
Figure (III.4)	Evolution du degré d'hydratation en fonction du dosage en filler (0, 10, 20%)	65

Chapitre IV

Figure (IV.1)	Analyse granulométrique courbes granulaires continues et discontinues	71
Figure (IV.2)	Droite de référence Bolomey	78
Figure (IV.3)	Courbes de référence Faury	83
Figure (IV.4)	Utilisation d'abaque (méthode Dreux)	85

Chapitre V

Figure (V.1)	Ciment utilisé CEMII/B-L 42.5N	91
Figure (V.2)	Fillers calcaires 0/0.125	92
Figure (V.3)	Superplastifiant « GLENIUM® 26 »	93
Figure (V.4)	Les tamis utilisés	96
Figure (V.5)	Essai d'analyse granulométrique.	97
Figure (V.6)	La courbe granulométrique (gravier 3/8 et 8/15)	98
Figure (V.7)	Essai pour la détermination des propriétés superficielles	101

Figure (V.8)	Forme d'un granulats.	102
Figure (V.9)	Détermination du coefficient d'aplatissement C.A	105
Figure (V.10)	Essai de détermination de la masse volumique apparente du gravier 3/8	107
Figure (V.11)	Essai de détermination de la masse volumique apparente du gravier 8/15	107
Figure (V.12)	Détermination de la masse volumique absolue du gravier (3/8 et 8/15)	109
Figure (V.13)	Appareil de Los Angeles	110
Figure (V.14)	Préparation des échantillons pour l'essai Los Angeles	112
Figure (V.15)	Essai Los Angeles	113
Figure (V.16)	Echantillon après l'essai L.A	114
Figure (V.17)	Essai pour la détermination des carbonates dans les graviers (3/8 et 8/15) (méthode calcimètre)	116
Figure (V.18)	Colonne des tamis utilisés (sable)	118
Figure (V.19)	essai d'analyse granulométrique (sable)	119
Figure (V.20)	Courbe granulométrique du sable	120
Figure (V.21)	Préparation d'un échantillon de sable pour l'essai ES	123
Figure (V.22)	Essai d'équivalent de sable	124
Figure (V.23)	Détermination des hauteurs (h_1 , h_2) visuel et par piston	125
Figure (V.24)	Essai d'équivalent de sable visuel et par piston.	125
Figure (V.25)	Test à la tache	127
Figure (V.26)	Préparation d'échantillon pour l'essai au bleu	129
Figure (V.27)	Essai au bleu de méthylène « méthode à la tache »	130
Figure (V.28)	Essai de détermination de la masse volumique apparente du sable.	131
Figure (V.29)	Détermination de la masse volumique absolue du sable (méthode de pycnomètre)	133
Figure (V.30)	Préparation des ingrédients secs pour la confection des mélanges de béton (BO, BHP)	138
Figure (V.31)	Préparation des constituants dans la cuve du malaxeur	139
Figure (V.32)	Malaxage à sec des constituants	139
Figure (V.33)	Préparations des ingrédients liquides	139
Figure (V.34)	La confection des bétons	139

Figure (V.35)	Mesure de l'affaissement du béton par slump-test « cône d'Abrams »	140
Figure (V.36)	Remplissage des moules (16x32 cm)	140
Figure (V.37)	Conservation des éprouvettes avant démoulage	141
Figure (V.38)	Conservation des éprouvettes dans l'eau	141
Figure (V.39)	Machine d'essai d'écrasement	143
Figure (V.40)	Chargement des éprouvettes cylindriques pour essai de compression	143
Figure (V.41)	Chargement des éprouvettes cylindriques, essai de traction par fendage	144

Chapitre VI

Figure (VI.1)	Histogramme d'évolution des résistances à la compression en fonction du temps	148
Figure (VI.2)	Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction du temps (courbes)	149
Figure (VI.3)	Evolutions des résistances en traction par fendage en fonction du temps des deux bétons	151
Figure (VI.4)	La résistance en traction par fendage pour les 2 bétons en fonction du temps (courbes)	151
Figure (VI.5)	Développement de la résistance à la compression de béton HP contenant des additions minérales	154

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau (I.1)	Résistance à la compression de BHP en fonction Eau/liant	08
Tableau (I.2)	Les deux voies d'obtention des BHP	16
Tableau (I.3)	Résistance à la compression des différents bétons	17
Tableau (I.4)	Caractéristique de résistance et de déformation suivant la norme EN1992	18
Tableau (I.5)	Comparaison entre le retrait des bétons ordinaires et celui des BHP	20
Tableau (I.6)	Traduction des performances mécaniques des BHP	30

Chapitre II

Tableau (II.1)	Composition chimique de certaines cendres volantes	40
Tableau (II.2)	Composition chimique de certains laitiers de haut fourneau	42
Tableau (II.3)	Composition chimique de certaines fumées de silices	45
Tableau (II.4)	Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes	53

Chapitre III

Tableau (III.1)	Critères sur les propriétés physiques	58
Tableau (III.2)	Critères sur les propriétés chimiques	58

Chapitre IV

Tableau (IV.1)	Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams	73
Tableau (IV.2)	Valeurs de (A) pour la méthode de Bolomey	79
Tableau (IV.3)	Valeurs optimales d'après Abrams du module de finesse des compositions granulaires des bétons courants.	80
Tableau (IV.4)	Valeur de A (méthode de Faury)	83

Chapitre V

Tableau (V.1)	Quelques caractéristiques de GLENIUM® 26	93
Tableau (V.2)	Tamis utilisés pour le tamisage des granulats.	95
Tableau (V.3)	L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/15)	97
Tableau (V.4)	L'analyse granulométrique de gravier 3/8	97
Tableau (V.5)	Résultats de propreté superficielle	101
Tableau (V.6)	Coefficient d'aplatissement	103
Tableau (V.7)	Coefficient d'aplatissement du gravier 8/15	105
Tableau (V.8)	La masse volumique apparente des granulats (3/8, 8/15).	108
Tableau (V.9)	Masse volumique absolue du gravier (3/8 et 8/15)	109
Tableau (V.10)	La dureté des agrégats en fonction du coefficient L.A	111
Tableau (V.11)	Classe granulaires et nombre de boulets d'acier pour l'essai Los Angeles	112
Tableau (V.12)	Détermination du coefficient L.A	114
Tableau (V.13)	Tableau des valeurs –Essai des carbonates (CaCO ₃)	117
Tableau (V.14)	Tamis utilisés pour le tamisage du sable.	118
Tableau (V.15)	Analyse granulométrique du sable	119
Tableau (V.16)	Modules de finesse du sable	120
Tableau (V.17)	Résultats d'essai d'équivalent de sable	125
Tableau (V.18)	Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV, ESP.	126
Tableau (V.19)	La valeur de VB du sable.	130

Tableau (V.20)	La masse volumique apparente du sable.	132
Tableau (V.21)	Masse volumique absolue du sable.	133
Tableau (V.22)	Les valeurs de A.	135
Tableau (V.23)	Tableau des valeurs de K	136
Tableau (V.24)	Composition du béton ordinaire pour 1m ³	137
Tableau (V.25)	Composition du béton HP pour 1m ³	137

Chapitre VI

Tableau (VI.1)	Caractéristiques des bétons à l'état frais.	146
Tableau (VI.2)	Récapitulatif des valeurs des résistances en compression aux différentes échéances des bétons (BO et BHP).	147
Tableau (VI.3)	Résultats de la résistance en traction par fendage des bétons.	150
Tableau (VI.4)	Modules d'élasticité calculés des deux bétons	152
Tableau (VI.5)	Comparaison des résultats expérimentaux des bétons à hautes performance	153

Introduction Générale

Introduction générale

Si l'on s'en tient à la définition du béton, mélange d'un liant et de granulats, son usage remonte à la haute Antiquité (3 000 à 700 avant J.-C.), avec les mélanges à base d'argile en Mésopotamie notamment. Mais ce matériau se dégradant rapidement, peu de vestiges attestent son utilisation.

Le « véritable » béton, au sens où nous l'entendons aujourd'hui, c'est-à-dire un mélange de ciment et de granulats, est utilisé dès l'époque romaine : les nombreux bâtiments de la Rome antique encore visibles témoignent de la résistance de leurs constructions.

Au XIXe siècle, grâce à l'industrialisation de la fabrication du ciment, de nombreuses avancées successives assurent le succès du béton. Un jardinier créatif, Joseph Monier (1823-1906) dépose, entre 1867 et 1891, plusieurs brevets décrivant un système de construction à base de fer et de ciment, destiné à fabriquer des jardinières, tuyaux et réservoirs à eau. Il est l'inventeur du « ciment armé ».

François Coignet (1841-1888) imagine alors en 1852 le béton armé et construit le tout premier immeuble en béton coulé avec fers profilés enrobés, à Saint-Denis, en région parisienne.

Les brevets se succèdent. En 1867, un immeuble en béton aggloméré est breveté à Paris par François Hennebique (1842-1921). Celui-ci imagine ensuite la première dalle en béton de ciment armé de fers ronds (1880), les poutres creuses en béton armé (1892), le pilote en béton armé à ligatures rapprochées (1896)...

La composition du béton est fixée en 1906 par un règlement, selon lequel 1 m³ de béton ordinaire est fabriqué à partir de 350 kg de ciment, 590 kg de sable, 1180 kg de gravier, et 210 litres d'eau.

Mais les déclinaisons et applications du béton se multiplient au XXe siècle : béton à poudres réactives, plus résistant, béton précontraint, contenant des câbles d'acier en tension, béton allégé, grâce à des billes de polystyrène...

Enfin, apparaissent à la fin des années 1980 les bétons hautes performances (BHP), puis les bétons autoplaçants et les bétons fibrés à ultra hautes performances.

Dans cette étude, nous sommes intéressés par les bétons à hautes performances. Un **béton hautes performances (BHP)** (ou béton à hautes performances) est un béton caractérisé par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 50 MPa à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais, à court ou à long terme. Ces propriétés élevées conduisent à préconiser l'utilisation de ce BHP pour les ouvrages soumis à de fortes sollicitations mécanique (bâtiments de grande hauteur, ponts, réservoirs, centrales nucléaires, etc). La résistance en milieu agressif conduit à les préconiser pour les travaux en milieu marin ou agressif.

Le béton hautes performances, matériau moderne est largement utilisé dans le monde, leur utilisation dans notre pays, reste limitée ou inexistante, malgré l'Algérie est riche en matériaux propres aux constructions. Les exigences et normes internationales en matière de la performance des matériaux de construction n'est pas encore suffisamment intégrées aux processus de conception et de construction, malgré les dégâts subis lors du séisme de Boumerdes en 2003. Les constructeurs utilisent toujours des bétons traditionnels avec des résistances d'environ 30 MPa, et qui ne dépassent les 40 MPa dans les meilleures conditions. Afin de répondre aux exigences d'une construction moderne et durable, l'Algérie doit obligatoirement utilisée les technologies innovantes dans le domaine d'élaboration des matériaux et bétons de construction.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux afin de fabriquer des BHP avec plusieurs caractéristiques rhéologiques et mécaniques améliorées, la durabilité en premier lieu et visant l'aspect économique en deuxième lieu.

Le choix du BHP comme matériau a un impact sur les coûts de construction initiaux (superplastifiant, addition minérales, ciment) mais la quantité de béton et de ferrailage est réduite. Il a aussi des conséquences tout au long de la vie utile des structures. En effet, ce choix a des effets sur les activités d'inspection, d'entretien et de réparation ainsi que sur sa disposition à la fin de sa vie utile. De plus, ces effets touchent également les usagers de la structure, la société, etc., donc le BHP est le béton le plus économique à long terme.

Pour améliorer les performances d'un béton, il convient d'en réduire la porosité en agissant sur le squelette granulaire (granulométrie) par l'addition de particules ultrafines (additions minérales tels que les fumées de silices, les cendres volantes, fillers calcaires, ..), l'ajout d'un adjuvant superplastifiant/haut réducteur d'eau, la réduction de l'eau.

Comme l'indique le thème de notre projet, nous nous intéressons à une étude basée sur l'ajout d'un produit minérale « filler calcaire », qui sert à améliorer les qualités du béton (ses performances mécaniques, son ouvrabilité et sa durabilité), Les objectifs visés par notre travail sont : dans un 1er point, de formuler un béton à hautes performances à base des matériaux locaux, ensuite de valoriser des matériaux locaux (fillers calcaires) en présence d'un adjuvant super plastifiant, afin de fabriquer un BHP avec des caractéristiques améliorées.

Ce mémoire s'organise en deux grandes parties :

Une partie théorique, qui est une synthèse bibliographique, elle comporte quatre chapitres. Le 1^{er} chapitre sous-titre « Les bétons à hautes performances », présente des généralités sur les BHP, définitions, applications. Le second chapitre donne un aperçu général sur les additions minérales et leurs actions sur les propriétés des bétons, le 3eme chapitre a pour objet de parler sur les fillers calcaires, et le dernier chapitre, le chapitre IV présente une revue de diverses méthodes de formulations des bétons « formulation des bétons courants et bétons HP ». Quant à la 2eme partie, la partie expérimentale est dédié à l'étude expérimentale, elle est consacrée à la caractérisation des matériaux utilisés pour la confection des bétons mis en œuvre dans le cadre de cette étude, la méthode de formulation ainsi que les compositions retenues pour le béton ordinaire et le béton HP sont mentionnées. Puis, sont détaillés les essais sur bétons à l'état frais et à l'état durci (chapitre V). Une comparaison des résultats par rapport au béton ordinaire et entre les différents BHP des années précédentes, est effectuée (chapitre.VI). Et enfin une conclusion générale et quelques recommandations et perspectives.

PARTIE I.

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre

I

Béton à hautes performances

Chapitre I

Les bétons à hautes performances

I.1 Introduction :

Depuis l'origine, le béton traditionnel est caractérisé essentiellement par sa résistance en compression de 20 à 50 MPa à 28 jours.

La résistance à la compression est généralement considérée comme la principale propriété caractéristique du béton. Depuis la découverte du béton armé, les études ont été axées sur la recherche des méthodes permettant de renforcer cette résistance. Des progrès considérables ont été enregistrés dans ce domaine au cours de ces dernières décennies. Aux Etats-Unis, durant les années 1950, une résistance à la compression de 35 MPa était considérée comme une résistance élevée. Dans les années 1970, la limite a été portée à 70 MPa, alors qu'en 1990, la notion de béton à haute résistance était réservée à un béton d'une résistance à la compression comprise entre 80 et 100 MPa, et cette évolution n'est pas terminée ! Des résistances à la compression supérieure à 120 MPa ont été réalisées lors de constructions récentes, il était donc tout à fait légitime d'employer l'expression « béton à haute résistance ». [1]

L'augmentation de la résistance à la compression du béton s'accompagne fréquemment de l'amélioration d'autres propriétés, comme la résistance à la traction, la rigidité, la durabilité, etc. Pour certaines applications, ces propriétés peuvent même être plus essentielles que le niveau de résistance atteint. Dans pareil cas, le choix des composants et de la composition ne doit pas être axé sur l'obtention d'une résistance maximale, mais davantage sur l'obtention d'une prestation optimale des propriétés souhaitées. La résistance supérieure obtenue est – pour ainsi dire – une incidence de second ordre. Il est parfaitement possible d'obtenir un béton présentant des hautes performances pour une propriété donnée, tout en ne possédant pas une résistance nettement supérieure, et c'est ainsi que le béton autocompactant a été initialement décrit au Japon comme un béton à hautes performances, en raison de son ouvrabilité exceptionnelle et de sa (très probable) amélioration au niveau de la durabilité. [1]

Les gains de résistance ne sont pas donc les seuls avantages de ces bétons, qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense et d'une forte réduction de leur porosité.

I.2 Définition des BHP :

Le béton haute performance, connu sous l'abréviation BHP, est défini comme étant un béton qui satisfait les performances requises qui ne peuvent pas être atteintes en utilisant les ingrédients usuels, méthode de malaxage, mise en œuvre et mûrissement normaux.

On appelle bétons à hautes performances les bétons « BHP » qui ont non seulement des résistances mécaniques plus élevées que celles des bétons ordinaires mais aussi une meilleure durabilité à long terme du fait qu'ils sont plus denses et compacts et donc imperméables.

Hautes performances signifient aussi faciliter de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. En effet, les BHP offrent aussi des résistances exceptionnelles à l'état frais (rhéologie, pompabilité, etc.) et des performances aux jeunes âges, ce qui permet par exemple d'accélérer les cadences de fabrication en usine ou sur chantier ou de pomper le matériau sur de longues distances. Ils confèrent une pérennité architecturale aux ouvrages et augmentent considérablement leur durabilité en réduisant corrélativement les frais de maintenance et d'entretien.

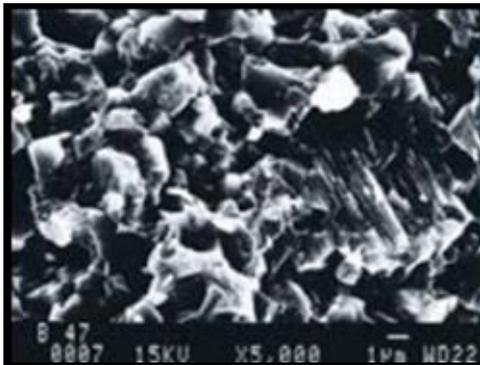
Les clefs de ces performances sont [2] :

- la réduction de la quantité d'eau opérée par l'ajout de superplastifiants ;
- l'optimisation de la répartition granulométrique des composants.

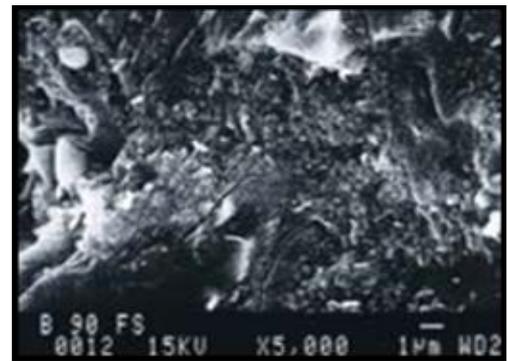
Cette optimisation de leurs performances est due, en particulier, aux récentes évolutions technologiques des adjuvants qui permettent des formulations avec une forte réduction du dosage en eau tout en conservant une maniabilité adéquate et à l'utilisation complémentaire éventuelle d'ultrafines qui complètent les vides du squelette granulaire entre les grains de ciment et améliorent la compacité. Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par :

- Une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa ;
- Un rapport Eau /liant inférieur à 0,4.

Ils présentent une microtexture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs.



Béton courant



BHP

Figure (I.1) : comparaison entre Béton courant et Béton à haute performance BHP (microstructure) [2]

I.3 Composition des bétons à hautes performances :

Un Béton à Hautes Performances « BHP » peut être défini comme étant un béton qui a une porosité réduite. Cette minimisation de la porosité est généralement obtenue en utilisant des rapports Eau/Ciment ou Eau/Liant plus faibles que dans le cas des Bétons Ordinaires « BO », associé à l'ajout d'adjuvants afin d'assurer une ouvrabilité satisfaisante. Ainsi, plus le béton est compact et meilleures sont ses résistances.

La rupture d'un béton se développe dans la partie la plus vulnérable des trois régions suivantes : la pâte de ciment, les granulats, ou la zone de transition entre la pâte-granulats appelé ITZ [Maso 1980].

Pour confectionner un béton résistant et performant, il faut par conséquent renforcer chacune de ces trois parties. Pour parvenir à réduire la porosité d'une pâte de ciment hydratée, il faut réduire la quantité d'eau de gâchage. Cela n'est possible qu'avec l'utilisation d'adjuvants. L'utilisation d'additions minérales (fumée de silice, filler calcaire par exemple) va également dans ce sens. Une pâte de ciment compacte permet une bonne transmission des contraintes aux granulats. Concernant ces derniers, le choix de leur nature minéralogique, de leur forme, de la dimension du plus gros granulat ainsi que l'optimisation de la distribution du squelette granulaire sont nécessaires.

La réduction du rapport eau/ciment de la pâte et le choix de la nature minéralogique des granulats sont des paramètres qui permettent également d'améliorer la résistance de la zone de transition (considérée comme le maillon faible dans le cas des bétons ordinaires).

I.3.1 Le ciment :

Le ciment doit permettre au BHP d'atteindre une classe de résistance donnée, tout en assurant une bonne maniabilité et une finition de qualité. A titre d'exemple, les BHP de la gamme 50-75 MPa peuvent être composés avec la plupart des ciments Portland commerciaux, alors que les BHP de résistance 75-100 MPa ne peuvent l'être qu'avec certains ciments, et rares sont les ciments Portland qui peuvent permettre d'obtenir tels quels des BHP de classe supérieure (BTHP de 100 à 125 MPa) [Aïtcin 2001]. Les performances des ciments commerciaux en termes de rhéologie et de résistance sont en effet très variables et seules quelques-uns possèdent simultanément de bonnes performances de résistances finales et de bonnes performances rhéologiques. Il existe bien évidemment, comme nous le verrons par la suite, des solutions qui permettent de pallier aux manques de performances des ciments commerciaux, (utilisation de superplastifiants réducteurs d'eau, additions minérales, etc.).

Les principales caractéristiques d'un ciment sont rappelées ci-dessous :

La finesse du ciment : la recherche de la finesse optimale est une des exigences pour réaliser un BHP. La finesse régit de façon directe la résistance du béton. Plus le broyage est fin, plus les phases silicatées entourant les particules sont nombreuses, ce qui est bénéfique pour la résistance. Cependant, une finesse élevée rend les ciments réactifs et conduit à une formation rapide d'ettringite et de C-S-H lors de l'hydratation, impactant négativement la rhéologie. L'autre inconvénient d'une finesse importante est lié aux risques de fissuration dus à un fort retrait.

La teneur en C₃S : les ciments à teneur élevée en C₃S présentent un intérêt pour la fabrication de BHP de forte résistance au jeune âge. En effet, le C₃S présente une meilleure réactivité par rapport au C₂S, ce dernier agissant plutôt sur les résistances à moyen et long terme. [3]

Composition de la phase interstitielle : elle régit la durabilité du béton en termes d'attaques chimiques. D'une façon générale, les ciments présentant un pH de la solution interstitielle faible sont plus résistants aux altérations chimiques (attaques acides en particulier). Ceci en raison de la meilleure stabilité chimique des phases solides qu'ils contiennent et de la diminution des gradients ioniques avec le milieu agressif qui en découlent. Un béton contenant peu de portlandite sera en particulier plus stable qu'un béton qui en contiendrait beaucoup [Camps 2008].

La teneur et morphologie du C₃A : pour la formulation des BHP, l'utilisation d'un ciment contenant une faible teneur en C₃A permet de faciliter le contrôle de la rhéologie. Une morphologie du C₃A à dominante cubique est préférable à celle orthorhombique. En effet, la rhéologie d'un ciment à base de C₃A cubique est facile à contrôler [Vernet et Noworyta 1992].

En outre, la limitation de la teneur en C₃A améliore la durabilité du béton en permettant une meilleure résistance aux milieux agressifs, en particulier aux attaques sulfatiques externes en raison de la limitation du risque de formation d'ettringite secondaire.

I.3.2 Les granulats :

Les granulats doivent avoir les caractéristiques adéquates permettant :

- De résister aux contraintes transmises par la pâte de ciment ;
- D'optimiser la densité du squelette granulaire final pour un béton compact ;
- D'obtenir une zone de transition pâte-granulats de bonne qualité.

Pour cela, les critères de sélection des granulats portent sur :

La nature minéralogique : son incidence sur la qualité de l'ITZ (Interfacial Transition Zone) et sur les risques de développement de l'alcali-réaction semble avérée mais aussi sur les déformations différées du béton [Neville 1996]. Les granulats calcaires offrent en particulier une meilleure affinité chimique avec la pâte de ciment. Ils limitent les risques d'alcali-réaction et possèdent des modules de compressibilité plus proche de la pâte de ciment que les granulats siliceux. En revanche, ils peuvent être sensibles à certaines altérations chimiques acides.

Dimensions, volume et forme des granulats : la taille des granulats a une influence sur les propriétés de résistance et de durabilité des bétons [Gonilho Pereira et al. 2008].

Bien que l'utilisation de gros granulats permette de diminuer la demande en eau (faible surface à mouiller par unité de masse), ce qui va dans le sens de l'augmentation de la résistance, il n'est pas recommandé d'en utiliser dans les BHP, car ils se comportent comme des inclusions rigides de grandes dimensions, induisant des systèmes d'auto-contraintes importants. Ils altèrent également les capacités de déformations différées et les propriétés thermiques. Il est admis que ces risques sont limités tant que la dimension maximale est inférieure à 10 ou 12 mm [Neville 2000]. Nichols (1982) [3] a établi que, pour chaque résistance de béton et donc pour chaque rapport eau/ciment, il existe une dimension maximale optimale pour le granulat.

De même, le volume des granulats possède un effet sur les propriétés mécaniques du béton. D'après Stocks et al (1979), (cité par [3]), les propriétés mécaniques (résistance en compression et module d'élasticité) augmentent avec la proportion de granulats, du moins dans le domaine des concentrations usuelles en granulats (60-75% en volume). Le même constat a été fait sur les déformations différées. Le fluage est d'autant plus faible que le volume relatif des granulats est conséquent.

Il a été observé que le passage de la teneur volumique en granulat de 65 à 75% entraîne une diminution du fluage de 10 % [Pons et Torrenti 2008]. Quant à la forme, l'utilisation de granulats concassés ou semi-concassés permet d'obtenir des meilleurs comportements mécaniques comparativement aux formes roulées [Mallier 1992].

L'optimisation de la distribution granulaire : elle permet d'augmenter la densité du squelette granulaire final et par conséquent d'obtenir un béton compact ayant de bonnes propriétés mécaniques. Parmi les méthodes d'optimisation de la répartition granulaire d'un béton, on peut citer Powers (1968), Bolomey (1935), Caquot (1937), Faury (1953). [3]

I.3.3 Additions minérales :

Ajouter une ou plusieurs additions minérales en complément ou en substitution partielle d'une certaine quantité de ciment est une alternative très intéressante du point de vue des résistances mécaniques et de la rhéologie. Les aspects économiques et environnementaux ne sont pas à négliger non plus : dans le cas d'une substitution, le coût de l'ajout est généralement inférieur à celui du ciment et les ajouts présentent généralement des bilans carbone meilleurs que ceux du clinker. [3]

Ce sont principalement : des fillers calcaires (calcaire, dolomite, ...), des fillers siliceux, des laitiers de haut fourneau, des cendres volantes, des fumées de silice.

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, ils augmentent la stabilité et l'ouvrabilité des bétons. Les cendres volantes ou les laitiers permet d'obtenir un maintien d'ouvrabilité le plus long. La fumée de silice conduit à une augmentation de la compacité d'un béton donc des résistances mécaniques plus élevées.

Nous parlons plus en détail de ces additions minérales dans le chapitre suivant.

I.3.4 Eau :

L'eau considérée comme matériau, n'est guère utilisée en construction que pour la confection des bétons. Le mélange sec des granulats et du liant ne peut se transformer en béton que par addition d'eau. La quantité d'eau que l'on ajoute au mélange sec s'appelle l'eau de gâchage.

La quantité d'eau de gâchage introduite dans le béton a une influence prépondérante sur la résistance.

I.3.4.1 Influence du rapport E/L :

Le rapport « eau/liant équivalent » « E/L », défini comme étant le rapport entre la masse de la teneur en eau efficace E et la teneur en liant équivalent L dans le béton frais, est un facteur fondamental dans la fabrication de BHP. Le terme « liant équivalent » utilisé dans les formulations BHP désigne la somme de la quantité de ciment et de la quantité d'additions minérales pondérée d'un coefficient de prise en compte de l'addition considérée k traduisant son degré d'activité comparativement à celle du ciment.

$$L_{eq} = C + kA \quad (\text{Eq I.1})$$

Avec :

C : la quantité de ciment par mètre cube de béton (en kg/m^3) ;

A : la quantité d'addition par mètre cube de béton (en kg/m^3) ;

K : est le coefficient de prise en compte de l'addition considérée (à titre d'exemple, $k = 2$ dans le cas où l'addition incorporée est la fumée de silice).

Pour atteindre les performances requises pour pouvoir qualifier un béton de HP, le rapport E/L doit être réduit en utilisant, d'une part, davantage de ciment tout en réduisant la quantité d'eau de gâchage (grâce à l'utilisation de superplastifiants), et d'autre part, en remplaçant chaque fois que cela est possible, une partie du ciment par un volume égal d'additions minérales. Un faible E/L permet non seulement la réduction de la porosité de la pâte de ciment hydraté, mais aussi la fabrication de produits d'hydratations de haute densité, qui sont la clef de la fabrication de bétons plus résistants et durables. Le tableau (I-1) donne la variation de résistance du béton à la compression en fonction du rapport E/L.

Tableau I.1 : Résistance à la compression de BHP en fonction du rapport Eau/liant [4]

E/L	Variation de la résistance à la compression maximale (en MPa)
0.4 – 0.35	50 à 75
0.35 – 0.3	75 à 100
0.3 – 0.25	100 à 125
0.25 – 0.2	Plus de 125

I.3.5 Adjuvants superplastifiants :

L'eau de gâchage remplit deux fonctions principales : une fonction chimique d'hydratation des particules anhydres du ciment et une fonction physique qui consiste à donner au béton les propriétés rhéologiques nécessaires à sa mise en place à l'état frais. L'idéal serait de formuler des bétons avec assez d'eau pour, à la fois, développer la résistance optimale du ciment et conférer au béton frais une maniabilité appropriée. Or, les particules de ciment présentent de nombreuses charges électriques ou superficielles non saturées. Au contact de l'eau, les particules de ciment flocculent [Kreijger 1980 ; Paillière 1982 ; Legrand 1982]. En flocculant, elles retiennent une certaine quantité d'eau qui n'est plus disponible pour assurer l'ouvrabilité désirée du béton. En l'absence d'adjuvants réducteurs d'eau, il est donc nécessaire d'utiliser davantage d'eau que nécessaire pour hydrater le ciment et obtenir une bonne maniabilité. Cependant, ce surplus d'eau crée de la porosité à l'intérieur de la pâte de ciment qui affecte les propriétés mécaniques et de durabilité du matériau béton.

L'utilisation d'adjuvants chimiques capables de diminuer la tendance de floculation des particules de ciment est la solution pour parvenir à réduire le rapport E/L tout en gardant une maniabilité convenable du béton à l'état frais. Il s'agit d'adjuvants réducteurs d'eau ou superplastifiants haut réducteurs d'eau.

De par leur fort pouvoir dispersant [Hewelt et Rixom 1977, Hattori 1979, Meyer 1979], les superplastifiants rendent possible la confection de bétons fluides avec des rapports E/L inférieur à 0,30. La taille et le volume des pores sont ainsi réduits, rendant les pâtes de ciments plus denses, ce qui améliore considérablement la résistance à la compression et la durabilité du béton.

En revanche, une attention particulière doit être apportée à la compatibilité ciment-superplastifiant, car les différents ciments Portland ne se comportent pas de la même façon avec tous les superplastifiants.

I.4 Microstructure des BHP :

Le BHP, comme tous les bétons, est avant tout un matériau hétérogène, constitué de deux phases principales : une phase liante que constitue la pâte de ciment durcie (matrice cimentaire) et une phase granulaire (granulats). La pâte de ciment durcie assure la fonction de « colle » responsable de l'adhérence des phases granulaires, conférant la rigidité au matériau (Phase liante). Cette pâte est polyphasique : phase solide, phase liquide et phase gazeuse. La phase solide est constituée des hydrates de ciment (grains hydratés) et d'anhydres (grains non hydratés). Elle contient principalement des silicates de calcium hydratés C-S-H, issus des réactions d'hydratation entre les constituants du ciment Portland et l'eau. La phase liquide correspond à l'eau interstitielle et la phase gazeuse aux vides remplis d'air et/ou de vapeur d'eau.

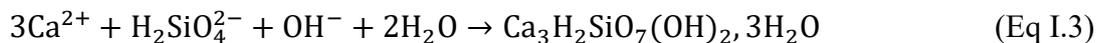
Dans cette partie, nous allons passer en revue les principales caractéristiques de la phase liante des matériaux cimentaires dont la connaissance est nécessaire à la compréhension des phénomènes à l'origine des déformations différées : les constituants du ciment Portland, les produits de leur hydratation, leur microstructure, leurs principales caractéristiques chimiques et physiques.

I.4.1 Composition et hydratation d'un ciment Portland :

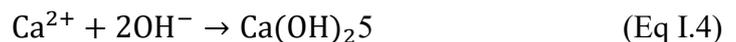
Le ciment Portland est un mélange de clinker 95% et de sulfate de calcium 5%. Le clinker est obtenu par cuisson à 1420°C d'un mélange finement broyé et homogénéisé de calcaire (80%) et d'argile (20%). Le clinker est composé de 4 constituants principaux :

1. Silicate tricalcique Ca_3SiO_5 ou alite (C_3S dans la notation des cimentiers) : le C_3S est le constituant majeur du clinker, sa proportion massique est de l'ordre de 60-65%. En substance, l'hydratation du C_3S au contact avec l'eau passe par 4 périodes :

- **Période initiale :** durant cette période de courte durée, les grains C_3S réagissent immédiatement pour former des silicates de calcium hydratés C-S-H.

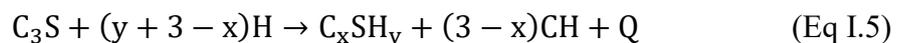


- **Période dormante :** la solution s'enrichit en ions calcium et hydroxyde non consommés par la réaction précédente et devient sursaturée par rapport à l'hydroxyde de calcium qui précipite sous forme de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$.



- **Période de prise :** lors de cette période, les réactions d'hydratation s'accélèrent. La précipitation de la portlandite produit un effet de « pompe à calcium » qui augmente la cinétique de la réaction de formation des C-S-H.
- **Période de durcissement :** elle est caractérisée par un ralentissement des réactions dû à la couche d'hydrates importante qui enrobe les grains de C_3S diminuant par-là la diffusion de l'eau et la vitesse d'hydratation du cœur des grains.

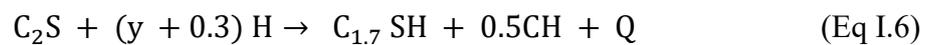
Au final, la réaction globale des réactions d'hydratation des C_3S s'écrit :



Q étant la quantité de chaleur dégagée par la réaction.

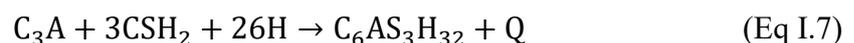
La stœchiométrie du C-S-H, donnée par le rapport C/S (CaO/SiO_2) et traduite par la lettre x , varie au cours de l'hydratation entre 1 et 2. Elle vaut en moyenne 1,7 dans le cas d'une pâte de ciment ordinaire [Taylor 1997]. Pour un matériau saturé, la valeur de y proposée est 3,91 [Taylor 1990].

2. Silicate bicalcique Ca_2SiO_4 ou bélite (C_2S la notation des cimentiers) : la proportion massique du C_2S contenu dans le clinker est environ de 10 à 20%. L'hydratation du C_2S est semblable à celle du C_3S mais se distingue par une cinétique plus lente et aussi une teneur en portlandite plus faible. La réaction d'hydratation du C_2S est moins exothermique que celle du C_3S . Pour un rapport C/S égal à 1,7 l'équation globale s'écrit :



3. Aluminate tricalcique $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ou célite (C_3A la notation des cimentiers) : sa proportion dans le Clinker varie d'un minéral à l'autre entre 8 à 12%. L'hydratation des aluminates de calcium au contact de l'eau se produit de façon similaire à celle des silicates de calcium, selon les mêmes processus de dissolution et d'hydrolyse, mais avec un dégagement de chaleur plus important. En l'absence de sulfate de calcium (gypse), une rigidification se produit par formation du C_3AH_6 . C'est afin d'éviter une prise rapide de la pâte que l'on ajoute du sulfate de calcium au clinker sous forme de gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) de plâtre ou hémihydrate ($\text{CaSO}_4, 0.5\text{H}_2\text{O}$) ou d'anhydrite (CaSO_4).

Tant que la concentration en sulfate est suffisante, le trisulfoaluminate de calcium hydraté $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}, 26\text{H}_2\text{O}$ ou ettringite ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ en notation cimentaire) se forme préférentiellement car il s'agit de la phase la moins soluble.



4. Alumino-ferrite tétracalcique $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6\text{Fe}_2$ (C_4AF la notation des cimentiers) : avec une proportion de 8 à 10%, il s'hydrate de façon analogue à celle du C_3A avec une vitesse ralentie, un faible dégagement de chaleur et des hydrates formés contenant de l'oxyde de fer Fe_2O_3 .

I.4.2 Principaux hydrates de la pâte de ciment durcie :

Nous présentons les principaux hydrates issus de l'hydratation du clinker portland qui composent à 90% la pâte de ciment durcie.

I.4.2.1 Silicate de calcium hydraté C-S-H :

Ils constituent 70% en masse de la phase liante de la pâte de ciment durcie. Ces composés amorphes nanocristallins confèrent à la pâte de ciment durcie ses principales propriétés notamment les caractéristiques mécaniques. Leur structure est lamellaire en feuillet.

I.4.2.2 Portlandite :

La portlandite est la dénomination minéralogique de l'hydroxyde de calcium cristallisé $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sa proportion massique est d'environ 20%. Elle représente la phase la plus soluble de la pâte de ciment hydratée. Sa solubilité dans l'eau est de 22 mmol/l à 25°C. La portlandite cristallise sous forme de cristaux hexagonaux.

I.4.2.3 AFt et AFm :

L'AFt désigne le trisulfoaluminate de calcium hydraté appelée également ettringite ($3\text{CaO} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). L'AFm désigne quant à lui le monosulfoaluminate de calcium hydraté. Ils ont des structures différentes. L'ettringite se présente sous forme d'aiguilles tandis que les monosulfoaluminates de calcium hydratés sont de structure hexagonale dérivant directement de celle de la portlandite.

I.4.3 Particularité de l'hydratation des BHP :

Etant donné que les BHP sont formulés à partir des mêmes ciments que les bétons usuels (bétons ordinaires BO), les réactions chimiques, processus d'hydratation et hydrates formés, sont par conséquent analogues. La différence réside dans le volume ainsi que dans la compacité des hydrates produits : produits internes de haute densité (High Density HD) ou externes de faible densité (Low Density LD). La nature de ces derniers est étroitement liée au rapport E/L [Tennis et Jennings 2000]. En effet, en réduisant le rapport E/L (cas des BHP) de la pâte de ciment, les particules de ciment se rapprochent les unes des autres laissant ainsi moins d'espace pour les produits externes [Mehta et Monteiro 1993]. En conséquence, la principale caractéristique des gels de C-S-H issus d'un faible ratio E/L réside dans leur

compacité et une plus grande proportion de gels HD que dans le cas de gels issus d'un ratio E/L grand.

I.4.4 Porosité de la pâte de ciment :

La porosité d'un béton, caractérisée par sa taille et son interconnexion, est un paramètre important dont la durabilité en termes d'attaques d'agents agressifs mais aussi les déformations différées (retrait et fluage) sont tributaires. La structure poreuse régit la difficulté de mouvement de l'eau. Dans une pâte de ciment, on constate deux types de porosité :

- Une porosité capillaire constituée de pores de gros diamètres supérieurs à 100 nm issus de vides vestiges de l'eau capillaire qui ne participe pas à l'hydratation ;
- Une porosité des hydrates (pores de très faibles diamètres, de l'ordre du nanomètre).

En présence de cendres volantes ou de laitier, la plus grande taille des pores est augmentée aux très jeunes âges, mais à plus long terme, leur effet se traduit par une diminution de la taille des plus gros pores. En effet, les réactions pouzzolaniques entraînent la formation de C-S-H secondaires qui réduisent la porosité, ce qui est favorable vis-à-vis de la durabilité [Feldman 1983]. Pour ce qui est de la fumée de silice, son effet sur la porosité des bétons est bénéfique notamment sur l'auréole de transition à l'interface pâte-granulat [Persson 1998].

I.4.5 Influence de l'auréole de transition :

Au voisinage des granulats (sable et gravillons), il existe une variation locale de la teneur en eau. Dans cette zone-là, l'arrangement des grains de ciment est perturbé par les surfaces des granulats et la pâte se trouve confinée dans des espaces réduits. Cette zone, d'une épaisseur de l'ordre de quelques dizaines de micromètres pour les BHP contre environ 50 μm à 100 μm dans les BO avec E/L= 0,5 à 0,7 est dénommée, comme nous l'avons déjà présentée précédemment, auréole de transition ou ITZ (Interfacial Transition Zone) [Maso 1980 ; Ollivier 1995]. Elle se distingue du reste de la pâte par une porosité plus grossière et de larges cristaux. La Figure I-2 ci-dessous met en évidence l'effet de l'interface pâte granulat sur la porosité.

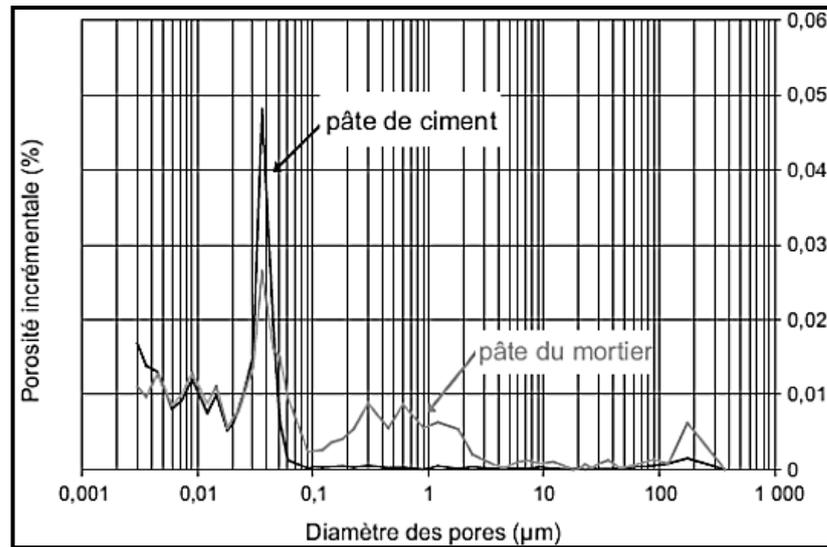


Figure I.2 : Structure poreuse d'une pâte de ciment de type CEM I et de la pâte d'un mortier confectionné avec le même ciment ($E/C = 0,4$, 3 mois) [Bourdette et al. 1995].

Il résulte de cet accroissement local de porosité une moindre résistance lorsque le béton est soumis à des sollicitations mécaniques. Les fissures s'amorcent ainsi de façon préférentielle au niveau de l'interface. Pour pallier à cette fragilité observée dans les BO et pouvoir atteindre des hautes performances, un renforcement de cette zone doit être apportée [Aïtcin 1989 ; Baalbaki et al. 1991, 1992 ; Ezeldin et Aïtcin 1991]. L'incorporation de fumée de silice et la réduction du rapport E/L réduisent sa porosité mais aussi son épaisseur, et finalement sa fragilité. Aïtcin (2003) considère même cette zone comme inexistante dans certains BHP. Ce phénomène s'explique par la densification de la structure du matériau apportée par l'ajout de la fumée de silice. En outre, la nature pétrographique ainsi que la forme des granulats sont deux facteurs déterminants sur la qualité de l'interface pâte-granulats. En effet, les granulats calcaires réactifs en contact avec la pâte de ciment, contrairement à ceux neutres de type quartzeux, forment les plus fortes liaisons avec la pâte de ciment, rendant ainsi le matériau plus résistant. Quant à la forme, l'ITZ est de meilleure qualité lorsqu'ils sont concassés ou semi-concassés [Malier 1992].

I.5 Les voies d'obtention des hautes performances :

Les progrès dans la compréhension scientifique des mécanismes de prise et de durcissement, les recherches sur l'optimisation des empilements granulaires et les mécanismes de défloculation ont permis de bouleverser les connaissances sur la rhéologie des bétons frais et la durabilité des bétons durcis. Elles ont montré les effets néfastes pour la résistance et la durabilité, des excès d'eau non hydratée mais nécessaire à la maniabilité lors de la mise en œuvre. [5]

Dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives du béton, il était donc nécessaire d'explorer les voies visant à réduire ce dosage en eau. Deux voies sont généralement associées pour optimiser la formulation d'un BHP :

I.5.1 Défloculation des grains de ciments et réduction de la teneur en eau :

Cette défloculation est obtenue par l'emploi de produits organiques (formaldéhyde et mélamine sulfonate, formaldéhyde et naphthalène sulfonate), ces superplastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment en suspension dans l'eau, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme.

Ils permettent une réduction sensible de l'eau de gâchage (une partie de l'eau n'est plus piégée dans les floccs de ciment) tout en garantissant une ouvrabilité satisfaisante, une amélioration de la fluidité et une diminution très importante de la porosité du béton à l'état durci. [5]

I.5.2 Optimisation du squelette et de l'empilement granulaire :

Les performances des BHP peuvent encore être augmentées par l'optimisation du mélange granulaire grâce à l'ajout de particules ultrafines (fumées de silice, filler calcaires, etc.). Elles ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les microvides intergranulaires et en densifiant l'interface pâte de ciment-granulat. Elles augmentent la compacité du mélange et améliorent sa rhéologie à l'état frais. Cette optimisation du squelette granulaire permet aussi de réduire la teneur en eau. [2]

Tableau I.2 : Les deux voies d'obtention des BHP [5]

Les deux voies d'obtention	
Réduire la floculation des grains de ciment	Etendre le spectre du mélange granulaire
Superplastifiants : <ul style="list-style-type: none"> - Formaldéhyde et mélamine sulfonate ; - Formaldéhyde et naphthalène sulfonate. 	Ajouts cimentaires : <ul style="list-style-type: none"> - Fumées de silice ; - Filler calcaires ; - Etc.

Notons que la première voie peut être utilisée seule et conduit déjà à des gains de propriétés constructives, d'ouvrabilité et durabilité intéressantes. La seconde voie, évidemment, implique le recours simultané à la première, tant il est sur inutile de compléter le spectre du mélange granulaire en direction des éléments très fins si l'on n'a pas, avant tout, réduit la floculation.

L'application de ces principes permet, d'obtenir des bétons à hautes performances qualifiés, en terme de résistance caractéristique à la compression, par des valeurs comprises entre 60 et 80 MPa.

I.6 Propriétés physico-chimiques et mécaniques des BHP :

Les diverses propriétés des BHP découlent de leur faible porosité, gage de durabilité. Le béton frais présente une bonne ouvrabilité liée aux superplastifiants entrant dans sa composition.

Les BHP sont des bétons fluides avec un E/C très bas (0,30 à 0,4). Les valeurs d'affaissement au cône sont supérieures à 15 cm dans la plupart des cas. [6]

Pour le béton durci, la propriété fondamentale est sa faible porosité. Un béton courant présente une porosité de 10 à 12 %, pour un béton HP, elle est inférieure à 5 %.

La durabilité est améliorée du fait de l'abaissement de la porosité et de la perméabilité.

Les bétons HP présentent généralement une résistance au gel améliorée. L'ensemble des résistances mécaniques (compression, traction) est augmenté, alors que les déformations sous charges instantanées et surtout sous charges permanentes sont diminuées. [6]

I.6.1 La résistance à la compression / et à la traction :

Les bétons normaux ont généralement un rapport eau / ciment compris entre 0.5 et 0.6 tandis que les bétons hautes performances ont un rapport eau / ciment de l'ordre de 0.3, lorsque ce rapport diminue, la résistance à la compression du béton augmente, cette résistance est une caractéristique souvent utilisée pour classer les bétons HP. C'est ainsi que les spécialistes distinguent : [6]

Tableau I.3 : Résistance caractéristique à la compression des différents bétons [6]

Classe	Résistance caractéristique à la compression (F_c) à 28 jours MPa
Bétons ordinaires.....	20 à 50
Bétons à hautes performances –BHP.....	60 à 100
Bétons à très hautes performances –BTHP....	100 à 150
Bétons exceptionnels.....	> à 150

Les gains de résistance se manifestent dès le jeune âge, un béton à 60 MPa à 28 jours peut dépasser 15 MPa à 24 heures et 40 MPa à 7 jours. Le gain est aussi important en termes de résistance en traction ou au cisaillement. (La résistance à la traction du béton est généralement liée à la résistance à la compression).

Les BHP offrent des performances mécaniques élevées à long terme, ces performances, qui découlent en particulier de sa faible porosité, se traduisent par :

- Une meilleure adhérence acier/béton ;
- Un fluage inférieur à celui des bétons ordinaires ;
- Une augmentation du module d'élasticité ;
- Une diminution des sections de béton ;
- Une résistance importante aux agents agressifs ;
- Un faible risque de corrosion des armatures ;
- Une forte résistance aux cycles de gel/dégel.

I.6.2 Module d'élasticité :

Le module d'élasticité du béton est essentiellement déterminé par les propriétés des granulats et de la matrice de mortier. Au fur et à mesure que la matrice se consolide et se rigidifie, le béton présentera également une rigidité accrue. Le module d'élasticité du béton à hautes performances est dès lors toujours lié à la résistance à la compression (tableau I.4) et de même que pour les bétons usuels, le module de déformation, instantané au jour j, peut être déduit de la résistance caractéristique selon la formule retenue par les règles BAEL :

$$E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3} \quad (\text{Eq I.8})$$

Le module de déformation des BHP est supérieur à celui des bétons traditionnels.

Tableau I.4 : Caractéristique de résistance et de déformation suivant la norme EN1992

	Classe de résistance										→	BHP
f_{cj} Résistance caractéristique												
en compression su cylindre	20	25	30	40	45	50	55	60	70	80	90	
[MPa]												
E_c Module d'élasticité	30	31	33	35	36	37	38	39	41	42	44	

I.6.3 Retrait :

Au cours du temps, même en l'absence de charges, une pièce en béton subit à un raccourcissement qu'on appelle le retrait. Cette contraction volumique additionne un retrait de séchage dû à une évaporation de l'eau libre contenue dans le béton et un retrait endogène. La valeur de retrait de séchage est fonction croissante des paramètres suivants :

- Teneur en eau du béton ;
- Dosage en ciment, et en général, teneur en éléments fins, qui toutes choses égales par ailleurs, sont liés à la quantité d'eau de gâchage nécessaire à une bonne mise en œuvre ;
- Sécheresse de l'atmosphère (une atmosphère sèche provoque une évaporation rapide et une partie d'eau n'a pas le temps de se combiner avec le ciment). On limite la dessiccation des bétons en procédant à la « crue » (arrosage des bétons pendant leur durcissement) ;
- Minceur des pièces (plus une pièce est mince, plus l'évaporation de l'eau est rapide).

Le retrait endogène apparaît surtout avec les bétons présentant un rapport eau/ciment (ou E/C) faible et une teneur élevée en fines (ciment et/ou additions de fines minérales). Dans ces conditions, le ciment prélève de telles quantités d'eau lors de l'hydratation du béton jeune que des pores remplis d'air se forment rapidement.

Ce phénomène d'autodessiccation (dessiccation interne) entraîne des pressions capillaires qui conduisent à un retrait rapide dans toute la masse du béton.

Le retrait endogène diffère du retrait de séchage du point de vue du mécanisme de diminution de l'humidité du béton. La différence essentielle réside dans le fait que la perte d'eau est due à l'évaporation dans le cas du retrait de séchage et à la réaction d'hydratation dans le cas du retrait endogène. Etant donné que le retrait endogène est provoqué par une dessiccation interne, il augmente lorsque le rapport eau/ciment (E/C) diminue, l'eau étant alors rapidement consommée par la réaction d'hydratation. [7]

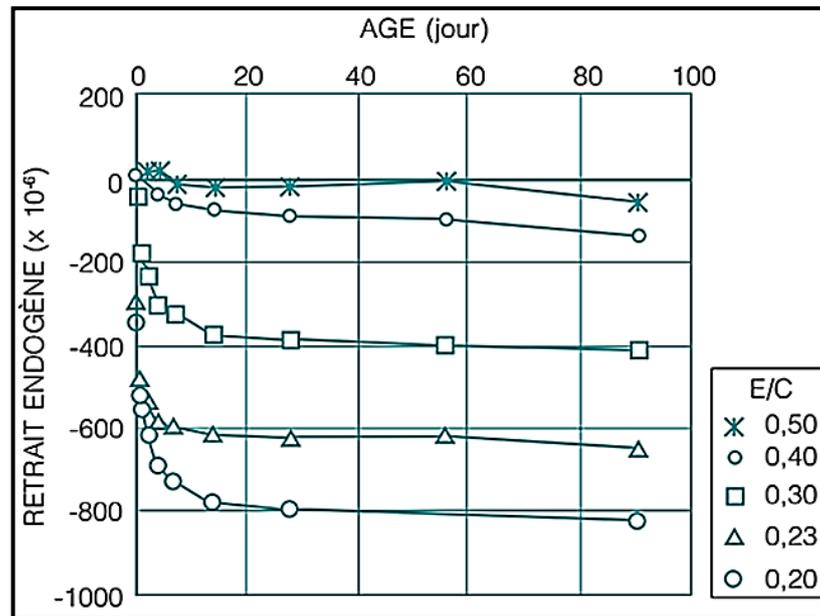


Figure I.3 : Evolution du retrait endogène en fonction du rapport E/C
(1000 x 10⁻⁶ équivaut à 1 mm/m) [7]

Etant donné que les bétons HP sont caractérisés par un faible rapport E/C et une teneur élevée en fines, les effets mécaniques du retrait endogène apparaissent comme prépondérants vis-à-vis des effets du retrait de séchage (tableau I.5). En l'absence de cure adéquate, le retrait endogène d'un béton ordinaire reste très faible (0,05 à 0,1 mm/m) alors que celui des BHP peut varier de 0,5 à 1 mm/m selon la teneur en ciment et le rapport E/C (figure I.3).

Tableau I.5 : Comparaison entre le retrait des bétons ordinaires et celui des BHP [7]

Types de bétons	Rapport E/C	Retrait de séchage	Retrait endogène
Bétons ordinaires	≈ 0.5	Elevé	Peu ou pas de tout
BHP	< 0.4	Faible	Elevé

I.6.4 Fluage :

Le fluage du béton à hautes performances – c'est-à-dire la déformation croissante sous l'effet d'une contrainte constante – est plus faible qu'un fluage observé pour un béton traditionnel. L'âge du béton au moment de la sollicitation est également extrêmement important pour le BHP. Lorsque la charge est exercée sur un béton jeune, la déformation par fluage sera plus importante que dans le cas d'un béton plus âgé. Il en va de même en ce qui concerne le béton conventionnel. Le fluage est d'autant plus faible que la résistance en compression est plus élevée.

Il convient de conserver à l'esprit que les contraintes observées dans le BHP sont nettement supérieures à celles inhérentes au béton conventionnel. Les déformations immédiates peuvent dès lors devenir aussi importantes – en fonction, bien évidemment, de la résistance à la flexion, dans le cas d'une poutre par exemple. Il va sans dire que ce phénomène est encore renforcé à long terme par le biais de l'utilisation d'un coefficient de retrait. En cas de constructions en BHP, la limitation des déformations et des flèches peut devenir le facteur déterminant du projet, plutôt que la portance proprement dite. Ce faisant, le matériau ne peut pas toujours être utilisé de manière optimale.

Le coefficient de fluage de l'ordre de 2 pour les bétons usuels, est compris entre 1 et 1,5 pour un béton à 60 MPa. [6]

I.6.5 Durabilité :

Etant donné la structure plus dense des pores du béton de hautes performances, ce matériau affiche un meilleur comportement face aux mécanismes d'agression. La plupart des processus de dégradation sont en effet causés par l'entrée de substances agressives, telles que des chlorures, du dioxyde de carbone, des acides, ... Si la pénétration de ces substances dans le béton est entravée, comme dans le cas du BHP, les processus de dégradation y afférant ne pourront bien évidemment se produire que bien plus tard.

Quoi qu'il en soit, il convient toujours de veiller à la pureté des éléments constitutifs du béton, afin d'éviter toute agression par des mécanismes internes (présence de sulfates, d'alcalis, de granulats réactifs, ...). Toutefois, la durée d'utilisation d'une construction est en grande partie également déterminée par les conditions d'exécution. [1]

I.6.6 Résistance au feu :

Même si la durabilité du BHP est en règle générale nettement supérieure à celle du béton conventionnel, la résistance au feu est cependant un élément sur lequel il convient d'attirer l'attention. En raison de la structure très dense des pores, la pression de vapeur, qui apparaît à l'intérieur du béton à des températures excédant 100 °C, peut difficilement être réduite. La vapeur ne peut en effet pas être rapidement évacuée à l'extérieur, en raison de la structure très dense du matériau. Par rapport au béton conventionnel, la résistance du béton à haute résistance diminuera dès lors plus rapidement si la température est supérieure à 100 °C. [1]

I.6.7 Résistance aux agents agressifs :

La faible perméabilité des BHP leur confère une bonne résistance à la pénétration et au transfert dans la masse du béton des agents agressifs en phase gazeuse ou liquide (eaux de mer, eaux sulfatées, solutions acides, dioxyde de carbone, etc.)

I.6.8 Tenue aux attaques gel / dégel :

Les BHP, correctement formulés, résistent aux cycles gel/dégel grâce à leur forte compacité et à leur résistance mécanique élevée.

La faible perméabilité des BHP et le faible rapport E/C favorisent une résistance plus importante aux risques d'écaillage en présence de sels de déverglaçage.

Il est possible de formuler des BHP qui résistent bien aux cycles gel/dégel et à l'écaillage sans ajouts d'entraîneur d'air. Lorsque le béton doit résister à un gel sévère (forte saturation d'eau), l'utilisation d'un entraîneur d'air est généralement nécessaire si le E/C est supérieur à 0,32.

I.6.9 Carbonatation :

De nombreuses études [2] ont démontré que la durabilité des BHP vis-à-vis de la carbonatation est très nettement supérieure à celle d'un béton traditionnel. En effet, le réseau poreux, peu connecté limite la diffusion du gaz carbonique au sein de la matrice cimentaire.

La faible porosité initiale favorise le colmatage des pores lié à la formation des cristaux de calcite. La progression de la carbonatation en profondeur est réduite, ce qui assure une meilleure protection des armatures.

I.6.10 Adhérence acier-béton :

La grande résistance mécanique du BHP et sa microstructure interne permettent de mobiliser une liaison supérieure entre les armatures en acier et le BHP et donc d'améliorer les qualités d'adhérence, ce qui permet une réduction des longueurs d'ancrage et de scellement. [2]

I.6.11 Réduction des flèches et des déformations des structures :

Plusieurs propriétés, de nature soit rhéologique, soit mécanique, permettent de réduire les flèches et les déformations dans les structures et les dalles en BHP: résistance à la traction du béton plus grande, module d'élasticité plus élevé, fluage plus faible et adhérence acier-béton supérieure.

I.6.12 Propriétés thermiques :

Les propriétés thermiques des BHP, telles que conductivité, chaleur spécifique et coefficient de dilatation ne diffèrent pas sensiblement de celles des bétons traditionnels.

I.7 Principaux domaines d'applications :

Sur le plan environnemental, les BHP s'insèrent complètement dans la démarche visant à utiliser encore mieux les ressources en énergie et en matières premières.

Sur le plan architectural également, le BHP est assorti d'un certain nombre de nouvelles possibilités. C'est ainsi que le BHP permet la réalisation de constructions plus élancées. Cet atout est d'ores et déjà matérialisé dans la réalisation d'ouvrages d'art (ponts), même si ce béton pourrait tout aussi bien être utilisé pour la construction de bâtiments. A l'heure actuelle, les avantages du BHP se concrétisent principalement dans l'obtention d'un espace intérieur le plus utile possible. Nous pourrions cependant aussi songer à un nouvel aspect de l'enveloppe de la construction, avec un regain d'attention porté aux éléments architecturaux tels que les arêtes, les arcs, les voûtes, ...

La façade d'un bâtiment pourrait en outre être redéfinie par l'utilisation potentielle de modules de dimensions supérieures. Alors que ces dimensions sont à l'heure actuelle généralement de 6 mètres, elles pourraient être portées à 7 ou à 8 mètres, grâce au BHP. Cette augmentation pourrait faciliter l'avènement d'une autre conception de façade et donc d'un aménagement intérieur modifié, davantage en phase avec les normes internationales actuelles.

Un autre avantage du BHP par rapport au béton conventionnel est l'aspect visuel des surfaces de béton, tant coulées sur place que pré-fabriquées. L'apparition de petites bulles d'air à la surface est souvent très limitée. La surface présente généralement une bonne texture, notamment grâce à la haute teneur en fines du béton.

I.7.1 Structures coulées en place :

La formulation et la fabrication de bétons dont la résistance caractéristique à 28 jours atteint 60 MPa est aujourd'hui de pratique courante et n'est plus du domaine expérimental. De nombreux ouvrages ont été exécutés en BHP ces dernières années.

Les centrales à béton sont équipées des automatismes, des process de fabrication, des procédés de dosages et des procédures de contrôle rigoureuses assurant la reproductibilité des caractéristiques et la maîtrise de la fabrication des BHP.

Le malaxage doit généralement être prolongé par rapport à celui d'un béton courant. Le BHP requiert un niveau de qualité de fabrication important compte tenu de la sensibilité de son comportement aux variations de proportion des constituants, en particulier du dosage en eau.

I.7.2 Produits préfabriqués en béton :

Le BHP est utilisé dans l'industrie du béton depuis de nombreuses années pour la réalisation de multiples éléments préfabriqués en usine. L'industrie des produits préfabriqués en béton a su, depuis son origine, produire des bétons à hautes performances grâce à ses techniques spécifiques et ses conditions industrielles de production. Elle dispose de moyens et de techniques bien adaptés pour produire des éléments avec des performances mécaniques et une durabilité encore améliorée en particulier grâce à l'association d'outils et de méthodes de production performants avec les progrès réalisés ces dernières années dans l'optimisation des matériaux tels que les BHP.

Le développement des BHP présente un grand intérêt pour l'industrie du béton. Ces matériaux permettent de proposer des produits nouveaux encore plus performants (allègements et réductions de sections) et d'envisager l'accès à de nouveaux marchés grâce à l'amélioration des performances.

Parmi les plus usuels, on peut citer les poutres et les poutrelles précontraintes pour plancher qui grâce au BHP ont leur section diminuée de 30 %, ainsi que les dalles alvéolées, qui pour une épaisseur n'excédant pas 25 cm permettent des portées de l'ordre de 15 m, ainsi que les tuyaux d'assainissement.

Les BHP permettent de précontraindre les produits à des contraintes plus élevées et donc d'optimiser les sections. Ils permettent aussi, pour la plupart des produits, de diminuer la durée des cycles de fabrication en autorisant des décoffrages rapides et des mises en précontrainte accélérée et de concevoir des éléments plus légers donc plus faciles à mettre en œuvre ou à poids équivalent de portées plus importantes. La diminution des déformations différées (retrait et fluage) est aussi un avantage déterminant en préfabrication. Ils autorisent la réalisation de produits élancés offrant aux architectes de nouvelles possibilités de création. Les usines de produits préfabriqués en béton utilisent régulièrement pour la fabrication de nombreux produits, des BHP dont la résistance à la compression dépasse 60 MPa et pouvant atteindre jusqu'à 100 MPa.

La réduction des sections, consécutive aux meilleures caractéristiques mécaniques du matériau, permet de diminuer le poids des éléments et par suite les coûts de manutention, de transport et de mise en place.

I.8 Réalité des bétons HP :

Les grandes résistances à court terme permettent un décoffrage rapide ainsi que des mises en précontraintes rapides. Ainsi les BHP sont utilisés pour des ouvrages : précontraints, préfabriqués, coulés en place...

Ces propriétés élevées au jeune âge conduisent à préconiser l'utilisation de ce BHP pour les ouvrages soumis à de fortes sollicitations mécanique (bâtiments de grande hauteur, ponts, réservoirs, centrales nucléaires, etc). La résistance en milieu agressif conduit à les préconiser pour les travaux en milieu marin ou agressif. Enfin lorsque le béton doit être pompé sur une grande hauteur, le BHP est recommandé du fait de sa grande manœuvrabilité.

I.8.1 Les ouvrages d'art :

Pont de l'Iroise (en France), comporte une travée centrale de 400 m pour une longueur totale de 800 m, c'est record mondial pour un pont haubané à nappe centrale. Les 104 haubans répartis en quatre nappes mesurent de 37 à 240 m et sont ancrés à deux pylônes de 115 m de hauteur réalisé en B60 [6]



Figure I.4 : Pont de l'Iroise

Pont Rion-Antirion (Grèce), d'une longueur totale de 2 883 m. [8]



Figure I.5 : Pont Rion-Antirion

Le pont de l'île Rousski (en russe), L'ouvrage est d'une longueur de 1 872 m. Le pont autoroutier, à 2×2 voies, est constitué de pylônes d'une hauteur de 320 m sur lesquels sont reliés 168 haubans et de 103 caissons d'acier orthotropes qui constituent le tablier. [8]



Figure I.6 : Pont de l'île Rousski

Le pont de Normandie (en France), est un ouvrage d'art exceptionnel, avec sa travée centrale de 856 m et ses pylônes de 214 m de hauteur. Les voussoirs des rampes d'accès ont été fabriqués avec du BHP de résistance 60 Mpa.[8]



Figure I.7 : Pont de Normandie

I.8.2 Le bâtiment :

La Grande Arche (France), est un monument situé à l'ouest de Paris. Le béton utilisé pour couler la partie supérieure de la Grande Arche présente des résistances supérieures à 65 MPa, et un slump de 22 à 25 cm. il a apporté à la fois la résistance exceptionnelle souhaitée et l'ouvrabilité rendue indispensable par un pompage sur une hauteur de plus de 100 m.[8]



Figure I.8 : Arche de la Défense (France)

Tour Khalifa (à Dubaï), pèse plus de 500 000 tonnes, une structure en béton à haute performance de 830 m de hauteur, plus de 330 000 m³ de BHP a été nécessaire à sa construction. Des ingénieurs ont mis au point un béton qui mélange vingt-cinq ingrédients.



Figure I.9 : Burj Khalifa [9]

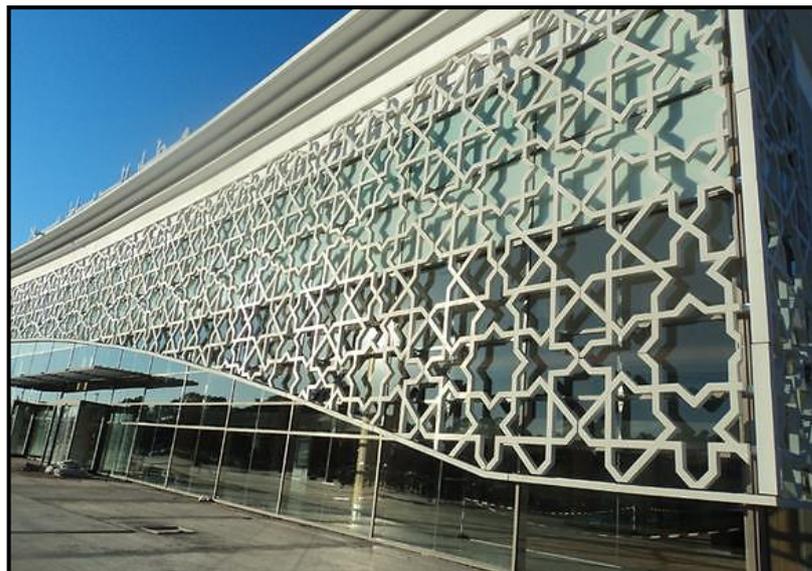
Aéroport international de Rabat-Salé, (Maroc)

Figure I.10 : la façade de l'aéroport [8]

Les North Galaxy Towers (Belgique), deux gratte-ciel de Bruxelles.

Figure I.11: North Galaxy Towers (Belgique) [8]

I.9 Les BHP en Algérie :

Le Béton à Hautes Performances (BHP) est de plus en plus utilisé dans les pays industrialisés mais n'est pas très connu dans notre pays.

L'Algérie connaît depuis une décennie un développement intense et soutenu des secteurs du bâtiment et de la construction. Que ce soient pour les grands projets de l'Etat (1million de logements sociaux, équipements socio-éducatifs, administratifs, ...) ou les grands projets immobiliers (résidentiels, tertiaires) et touristiques initiés par les promoteurs privés et publics.

Les exigences et normes internationales en matière de la performance des matériaux de construction n'est pas encore suffisamment intégrées aux processus de conception et de construction, malgré les dégâts subis lors du séisme de Boumerdes en 2003. Les constructeurs utilisent toujours des bétons traditionnels avec des résistances d'environ 30 MPa, et qui ne dépassent les 40 MPa dans les meilleures conditions. Ceci conduit à de grandes pressions sur les ressources (aciers d'armature, ciment, ...) et des impacts importants sur la durabilité des constructions. Afin de répondre aux exigences d'une construction moderne et durable, l'Algérie doit obligatoirement utilisée les technologies innovantes dans le domaine d'élaboration des matériaux et bétons de construction. Parmi les bétons innovants on trouve les BHP, dont l'utilisation à une double finalité : améliorer la résistance mécanique et la durabilité d'une part et économiser la consommation des matériaux de construction en réduisant les sections des éléments constructifs et en limitant le taux de ferrailage. Malgré que ces nouveaux bétons sont largement utilisés à travers le monde depuis plus de deux décennies. Leurs utilisations en Algérie, restent très limitées ou inexistantes.

Tableau I.6 : Traduction des performances mécaniques des BHP

Traduction des performances mécaniques des BHP
<ul style="list-style-type: none">• Résistance en traction supérieures, ce qui permet de limiter la précontrainte et d'amincir la section transversale en béton.• Performances en flexion qui se traduisent par une augmentation de la rigidité en flexion et qui permettent un allongement des portées et offrent des gains importants de poids propre, générant des économies de fondations.• Fluage inférieur à celui des bétons ordinaires et évolution plus rapide. Il en résulte des redistributions d'efforts plus faibles au cours de la durée du chantier et des premières années de mise en service et des déformations des structures moindres, ce qui autorise la conception de structures plus élancées et permet d'assurer un meilleur contrôle géométrique des ouvrages et une meilleure efficacité de la précontrainte. Les faibles déformations différées permettent de réduire les pertes de précontrainte.• Réduction de l'ouverture de fissures. L'emploi de BHP permet de réduire l'ouverture des fissures à contraintes égales dans les armatures et donc d'augmenter la résistance à la fissuration et à la ruine des structures.• Meilleure adhérence acier béton, d'où une réduction sensible des longueurs de recouvrement, de scellement et d'ancrage des armatures et une simplification des dispositions constructives et des schémas de ferrailage.• Augmentation des valeurs de contrainte de tractions admissibles ce qui permet de réduire les sections d'armatures.• Majoration des contraintes de cisaillement admissibles. Il en résulte la possibilité de réduire, par exemple, les épaisseurs des âmes des poutres en BHP sans augmentation corrélative des armatures transversales.• Réduction des épaisseurs d'enrobage compte tenu des faibles porosités et sensibilités aux agents agressifs des BHP.

I.10 Conclusion :

Les bétons à hautes performances sont des bétons qui développent dès le jeune âge des résistances élevées et permettent de réaliser des structures soumises à des contraintes élevées tels que les ouvrages d'art. La gamme de résistance de ces bétons se situe à 28 jours entre 50 et 90 MPa. L'emploi de bétons à hautes performances dans les structures d'ouvrages d'art reste pourtant indissociable du renforcement par des armatures d'aciers.

Alliés à la précontrainte, ces bétons permettent de concevoir et de réaliser des pièces d'ouvrage d'art très élancées, fines, légères et encore plus durables que les bétons ordinaires. La réduction considérable de l'épaisseur des structures permet un gain économique important par rapport aux bétons ordinaires du fait de la restriction des matières. De plus, ces bétons présentent une très bonne qualité d'adhérence avec les armatures d'acier qui est une condition nécessaire au transfert des efforts internes (PN BHP, 2000). Ces bétons développent aussi des résistances accrues vis-à-vis de la fissuration, permettant ainsi de mieux répondre aux différents états limites et déformabilités.

Chapitre

II

Les additions minérales

Chapitre II

Les additions minérales

II.1 Introduction :

La formulation des bétons qui, pendant très longtemps, a reposé sur une simple association ternaire ciment, eau et granulats, s'est progressivement compliquée au point qu'un béton actuel comporte de façon courante cinq constituants : ciment, eau, granulats, additions minérales et adjuvants, cet accroissement du nombre de constituants est, d'un point de vue pratique, très avantageux car il conduit, généralement, à l'amélioration très significative des performances mécaniques, physiques et durabilités des bétons.

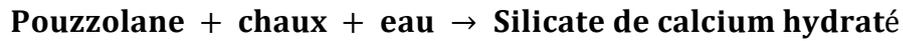
Le développement récent dans le domaine de la technologie du béton montre que l'incorporation conjuguée d'additions organiques et d'additions minérales fines et ultrafines conduit, généralement, à la réduction de la quantité d'eau nécessaire au gâchage et à l'augmentation conséquente de la compacité du matériau. Ainsi, des améliorations des propriétés mécaniques, physiques caractérisent ce nouveau béton.

Avant 1994 les additions sont plutôt désignées par le terme « ajout ». Ce terme était beaucoup plus utilisé pour les ciments et les ajouts étaient introduits en substitution partielle du clinker lors de la fabrication du ciment. Par contre le terme « Addition » était utilisé pour désigner un rapport ou une substitution du ciment par des ajouts lors de la formulation de béton au même titre que les autres constituants du béton (granulats, eau). [10]

Différentes additions minérales sont actuellement utilisées dans le béton, tels que les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, les laitiers des hauts fourneaux, les fillers calcaires ainsi que la fumée de silice,

Leur usage fournit au béton une matrice plus dense qui sera plus résistante aux produits agressifs tels que les sulfates, les chlorures et les autres agressifs, La finesse de ces minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin gouvernent leurs propriétés cimentaires dans le béton.

La plupart des additions minérales ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C₂S et du C₃S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland (NF P 18-508). On peut écrire donc une réaction pouzzolanique de la façon simple suivante :



L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C₂S et du C₃S (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux contribue à la chute de résistance de la pâte de ciment hydratée.

Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau, ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte de ciment. Le seul aspect positif de la présence de chaux dans un béton est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures d'acier.

Quand on fabrique des bétons, si on utilise 20 à 30% de pouzzolane, théoriquement, on pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment portland pour la transformer en C-S-H. Cependant, les conditions dans lesquelles on utilise le béton sont très différentes de cette situation idéale et la réaction pouzzolanique n'est jamais complète.

Ces matériaux étant des sous-produits industriels, leurs compositions chimiques sont en général moins bien définies que celle du ciment Portland.

II.2 Définition des additions :

Dans le domaine de génie civil, le terme « Addition » désigne à partir des années 1990, une catégorie de produits minéraux utilisés dans la confection des bétons et des mortiers. La norme européenne EN 206 -1 définit, les additions comme matériaux minéraux finement divisés et pouvant être ajoutés au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. [10]

Plusieurs produits qui correspondent à la désignation « additions » pour béton peuvent être considérés comme fines, poudres minérales ou encore récemment fillers.

II.3 Classifications des additions minérales :

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon et de la nature.

La norme européenne EN 206-1 (NF P 18-325), distingue les additions en deux types : celles quasiment inertes (de type I) et celles à caractère pouzzolanique ou à caractère hydraulique latent (de type II).

Comme additions de type I sont considérés en premier lieu les fillers dont les caractéristiques spécifiques sont déterminées par la pré-norme prEN 12620, ainsi que les pigments pour le béton conformes à la norme EN 12878.

Comme additions de type II sont considérées les fumées de silice conformes au prEN 13263 et les cendres volantes conformes à la norme EN 450.

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 18-508) ;
 - 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 18-502) ;
 - Les cendres volantes de houille (NF P 18-505) ;
 - Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau (NF P 18-506).

Généralement, on utilise dans les ciments et les bétons les matériaux minéraux suivants :

- Les pouzzolanes ;
- Les cendres volantes ;
- Les laitiers de haut fourneau ;
- Les fumées de silice ;
- Les fillers calcaires.

Nous rappelons ci-dessous les caractéristiques de ces types d'addition à travers leurs différentes propriétés ainsi que leurs impacts sur la microstructure et les performances des bétons.

II.3.1 Les pouzzolanes :

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux libéré par le clinker au cours de son hydratation, pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes.

A- Les pouzzolanes naturelles :

Les pouzzolanes naturelles, substances finement broyées ont une finesse à peu près identiques à celles du ciment, sont généralement d'origine volcanique ou des roches sédimentaires. Elles sont essentiellement composées de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques.



Figure II.1 : Pouzzolane naturelle

B- Les pouzzolanes artificielles :

La pouzzolane artificielle, est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement : argiles, schistes, latérite, bauxite et moler.



Figure II.2 : Pouzzolane artificielle

II.3.1.1 Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes :

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (Entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées. (Cas des squelettes siliceux de micro-organismes).

Les quantités de chaux sont limitées, ce qui explique par ailleurs, la capacité des pouzzolanes à fixer la chaux.

Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux. Elles sont plus au moins réactives. La réactivité est l'aspect chimique de fixation de la chaux.

L'activité pouzzolanique s'explique par une attaque lente de la silice et de l'alumine des pouzzolanes par l'hydroxyde de chaux (portlandite).

Des tests chimiques basés sur la quantité de chaux absorbée ou sur la vitesse de fixation ne suffisent pas pour déterminer la réactivité pouzzolanique.

D'autre part, la connaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure.

On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

- Ajouts de produits chimiques.
- Broyage à une finesse plus élevée.
- Traitement thermique.

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

- **Propriétés hydrauliques** : La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles.
- **Propriétés physiques de remplissage** : En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.

II.3.1.2 Effets des pouzzolanes sur le béton :

Les pouzzolanes confèrent aux bétons les propriétés suivantes :

▪ A l'état frais :

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.

▪ A l'état durci :

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.

- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces.

II.3.2 Les cendres volantes :

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables.

Cependant, comme on peut le voir dans le tableau II.1, La composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier. Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent aussi contenir seulement des particules angulaires.

La norme ASTM C-618-94 regroupe les cendres volantes en deux grandes classes suivant leur composition chimique : [11]

- **La classe F** riche en oxyde ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$) avec une teneur faible en chaux ($\text{CaO} < 10\%$). Elle est qualifiée de silicoalumineuse (cendre de houille), avec un faible potentiel pouzzolanique.
- **La classe C** riche en chaux ($\text{CaO} > 10\%$), avec une teneur en oxyde supérieur à 50%. Elle est qualifiée de sulfo-calcique (cendre de lignite) avec un potentiel pouzzolanique élevé.

Tableau II.1 : Composition chimique typique de certaines cendres volantes
(Aïtcin et al., 1986). [11]

	Classe F	Classe F	Classe C	Sulfo-calciq	Sulfo-calciq
SiO₂	59.4	47.4	36.2	24.0	13.5
Al₂O₃	22.4	21.3	17.4	18.5	5.5
Fe₂O₃	8.9	6.2	6.4	17.0	3.5
CaO	2.6	16.6	26.5	24.0	56
MgO	1.3	4.7	6.6	1.0	1.8
Na₂O	2.2	0.4	2.2	0.8	-
SO₃	2.4	1.5	2.8	8.0	15.1
Perte au feu	2.0	1.5	0.6	-	-
SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃	90.7	74.9	60.0	59.5	22.5
Chaux libre	-	-	-	-	28.0

La plupart des particules ont un diamètre compris entre 1 µ m et 100 µm, leur surface spécifique Blaine se situe généralement entre 250 et 600 m²/kg. La grande surface spécifique des cendres volantes signifie que le matériau réagit facilement avec l'hydroxyde de calcium.

D'une façon générale, l'introduction des cendres volantes dans le béton diminue la porosité et la perméabilité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives, en fixant progressivement la chaux. La cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable.

II.3.2.1 Effets des cendres volantes sur les caractéristiques du béton :

- **A l'état frais :**

Selon Venuat.M [cité par, 12], les cendres volantes agissent par leur finesse, leur forme, leur état de surface et leur faible masse volumique améliorent l'ouvrabilité des bétons. Ceci est d'autant plus marqué que les cendres volantes permettent de diminuer la quantité d'eau pour une même ouvrabilité, d'augmenter l'homogénéité et la compacité du béton et d'améliorer sa mise en place.

Venuat [12] mentionne qu'un remplacement de 20 à 30% de cendre modifie de peu le temps de prise à la température ordinaire. Dans le cas d'une assez forte addition, le temps de prise peut être augmenté. De même, la chaleur d'hydratation dégagée lors de la prise diminue régulièrement avec le pourcentage de cendre ajouté. Ceci est intéressant dans le cas de bétonnage d'ouvrages en grande masse ou par temps chaud.

▪ **A l'état durci :**

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'influence des cendres volantes sur le développement des résistances mécaniques des bétons. Gebler et al. 1986, cité par [12], mentionnent qu'à des températures normales, des cendres volantes de classe F provoquent une baisse des résistances des bétons au jeune âge (3 jours), mais avec des résistances supérieures à long terme. Pour un remplacement de 25% en masse du ciment par une cendre volante de classe F, Popovics 1986, cité par [12] constate une augmentation relative des résistances mécaniques du béton à partir de l'âge de 7 jours. Il rapporte que l'effet des cendres est plus significatif pour les bas rapports E/L.

Des chercheurs ont étudié l'effet d'une cendre volante de classe F sur la perméabilité du béton. Ils trouvent que les perméabilités à l'eau et à l'air augmentent surtout si le béton est mûri à l'air au jeune âge. Nagataki [12] a testé des bétons de rapport E/L de 0,40 avec des remplacements par la cendre volante variant de 0 à 50%. Il trouve que pour un béton mûri pendant 91 jours dans l'eau, la perméabilité à l'air diminue avec l'augmentation de la teneur en cendre jusqu'à un remplacement de 20%, puis elle devient pratiquement stable, trouve aussi que la cendre volante réduit la perméabilité aux ions chlore.

L'utilisation de la cendre volante n'a pas d'effet sur la carbonatation dans le béton. Uchikawa 1994, cité par [12] relève qu'avec un remplacement du ciment par la cendre volante, il y a plus de carbonatation du béton à cause de la faible réactivité pouzzolanique des cendres ce qui retarde le remplissage des pores dans les bétons ordinaires (E/L = 0,55).

Venuat [12] explique que la résistance au gel est légèrement diminuée dans le cas d'une addition de cendres volantes. Cette diminution est assez limitée pour 20% de cendre. La cendre volante absorbe une partie de l'agent entraîneurs d'air lors de l'addition de ce dernier au béton, c'est pourquoi les ciments aux cendres nécessitent une quantité d'adjuvant un peu plus élevée pour obtenir la même teneur en air. Certains chercheurs ont étudié la résistance au gel (ASTM C 666-A) de béton composés de 40 à 60% de cendre volante de classe F. Tous les bétons ont présenté des facteurs de durabilité supérieurs à 87% après 300

cycles de gel-dégel. Ils concluent que les bétons avec cendres volantes procurent de bonnes résistances au gel même pour des taux de remplacement élevés.

Venuat [12] a mentionné aussi que le retrait hydraulique après prise n'est jamais augmenté par l'addition de cendres volantes. Parfois et selon les ciments, il est plus ou moins diminué. Il explique ce phénomène par l'absorption des alcalis solubles (source de retrait) par les cendres pour former des silico-aluminates stables et insolubles.

II.3.3 Les laitiers de haut fourneau :

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

D'un point de vue chimique (tableau II.2), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte. Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au-dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément [13].

Tableau II.2 : Composition chimique typique de certains laitiers de haut fourneau.

Oxydes	Laitier français	Laitier nord-américain	Laitier algérien
SiO ₂ %	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al ₂ O ₃ %	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO %	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe ₂ O ₃ %	< 4	0.3 à 20	2.0
MgO %	< 6	3 à 12	4.7

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été broyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- Broyage poussé.
- Chaleur (étuvage, autoclavage).
- Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (gypse).

II.3.3.1 Effets sur les caractéristiques des bétons :

- **A l'état frais :**

L'utilisation du laitier dans le béton permet d'améliorer l'ouvrabilité par rapport à un béton conventionnel. Manai [12] explique ce phénomène par les caractéristiques des surfaces des grains de laitiers qui permettent un meilleur glissement intergranulaire dans la pâte. Il souligne aussi le très faible taux d'adsorption d'eau par les grains de laitiers au début du malaxage.

Venuat [12] explique que les bétons contenant du laitier ont des temps de prise un peu plus longs que les bétons conventionnels, surtout dans le cas de bétonnage par temps froid.

- **A l'état durci :**

Selon Venuat [12], les bétons avec le laitier ont des résistances moins élevées que les bétons ordinaires durant les premiers jours. Ces bétons commencent à se rattraper au bout de sept jours à 20°C. Venuat rapporte aussi que les laitiers permettent de réaliser des bétons résistant à l'action des eaux agressives, surtout en immersion complète.

II.3.4 Les fumées de silice :

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de Ferro silicium ou de zircone. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de Ferro silicium). Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, SiO se forme et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice SiO₂. Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage.



Figure II.3 : fumée de silice sous forme de poudre

D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice (Tableau II.3). La teneur en SiO₂ de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée plus la teneur en SiO₂ de la fumée de silice est élevée.

Les fumées de silice produites durant la fabrication de silicium métal contiennent en général plus de 90% de SiO₂. La fumée de silice produite lors de la fabrication d'un alliage Fe-Si à 75% à une teneur en silice généralement supérieure à 85%.

Du point de vue structural, la fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse. Du point de vue physique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre 0.03 μ m et 0.3 μ m (le diamètre moyen habituel se situant en dessous de 0.1 μ m), de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/ 10 de micron [11].

Tableau II.3 : Composition chimique typique de certaines fumées de silice
(Après Aïtcin, 1983)

Composés (%)	Silicium (grise)	Ferro-silicium (grise)	Ferro-silicium (blanche)
SiO₂	93.7	87.3	90
Al₂O₃	0.6	1	1
CaO	0.2	0.4	0.1
Fe₂O₃	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2
Na₂O	0.2	0.2	0.9
K₂O	0.5	0.6	1.3
Perte au feu	2.9	0.6	1.2

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler (figure II.4). Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice. Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique. La fumée de silice est aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, mais le terme fumée de silice est le plus généralement utilisé. La densité de la fumée de silice est généralement de 2,2, mais aussi un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Elle est moins dense que le ciment Portland dont la densité est 3,1.

Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise (figure II.3). Lorsque l'on considère les propriétés du béton aux fumées de silice, il importe de garder à l'esprit qu'on utilise ces dernières de deux manières différentes :

- Comme substitue du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées, en général pour des raisons d'économie.
- Comme ajout, pour améliorer les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci [11].

A cause de leur grande finesse, les particules de fumée de silice peuvent remplir les vides qui se trouvent entre les plus grosses particules de ciment figure II.4. [11]

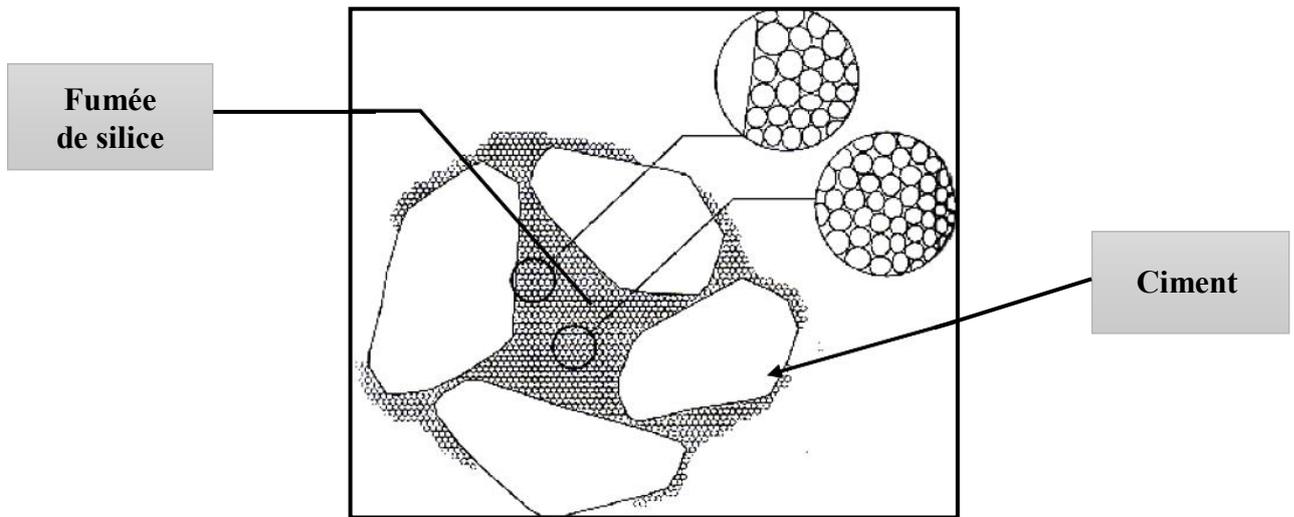


Figure II.4 : Effet filler de la fumée de silice d'après H.Bache [11]

II.3.4.1 Effets sur les propriétés du béton :

▪ A l'état frais :

Les particules fines de fumée de silice agissent par leur effet filler (figure II.4) en remplissant les microspores, ce qui conduit à une granulométrie plus étalée et une structure plus dense. Ceci libère l'eau qui a été emprisonnée dans les pores et permet une réduction de la demande en eau pour une consistance fixe.

D'autre part, compte tenu de leur surface spécifique élevée, il peut y avoir une adsorption d'eau et par contre une augmentation de la demande en eau dépendant du rapport E/L, de la présence de superplastifiant, de la teneur en ciment et de la concentration en fumée de silice.

Certains chercheurs ont montré que pour des dosages en ciment de 200, 300 et 400 kg/m³, on peut ajouter respectivement jusqu'à 2, 4 et 6% de fumée de silice sans augmenter le seuil de rigidité du béton avec une amélioration de la viscosité plastique. Ceci est attribué à l'amélioration du dosage supérieurs inversent le phénomène par augmentation des frictions entre les fines. Le béton devient très riche, très collant et très cohésif.

En général, Les bétons formulés avec la fumée de silice ont une rhéologie différente des bétons courants. Ils sont thixotropes et ont donc un comportement visqueux et compact au repos et deviennent fluides dès qu'on leur applique une pression.

- **A l'état durci :**

La fumée de silice permet d'optimiser l'empilement granulaire et ainsi d'améliorer l'adhésion des différents constituants d'un béton, ce qui a un impact direct sur ses propriétés mécaniques, en particulier sur les résistances mécaniques en compression. Ces dernières sont directement liées à la quantité de fumée de silice ajoutée au ciment. L'utilisation de fumée de silice pour un béton de même qualité permet d'augmenter la proportion de granulats grossiers par rapport aux granulats fins.

L'utilisation de fumée de silice limite la porosité des bétons en réduisant la taille des pores. Cette baisse de la porosité et de la perméabilité empêche la pénétration d'agents agressifs comme notamment les acides, les sulfates, le dioxyde de carbone et les chlorures marins. L'utilisation de la fumée de silice est un atout pour prévenir la corrosion dans un environnement contraignant : ports, aéroports, plateformes industrielles, ouvrages en bord de mer.

La fumée de silice a un effet favorable vis-à-vis du phénomène d'alcali-réaction. Les particules fines et amorphes de la fumée de silice réagissent avec les alcalins du ciment et réduisent ainsi leur teneur dans le béton avant son durcissement.

II.3.5 Les fillers calcaires :

Le terme filler fait référence à tout produit obtenu par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, bentonite...) naturelles ou non, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns.

Les fillers se différencient les uns des autres par :

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, les impuretés qui' ils contiennent.
- Leur finesse, la forme des grains.
- Leur dureté, leur porosité.

Le plus commun des fillers est du calcaire très finement broyé. Il peut aussi s'agir de silice finement broyée, un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Leur composition chimique est celle du carbonate de calcium. Ils peuvent contenir de l'oxyde de magnésium, il s'agit alors de calcaires dolomitiques.

Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes :

- Origine métamorphique, il s'agit de marbres.
- Origine sédimentaire.

II.3.5.1 Effets des fillers calcaires sur le béton :

- **A l'état frais :**

Les fillers calcaires réduisent légèrement la demande en eau du béton, améliorent les propriétés rhéologiques de la pâte et du béton frais et réduisent notablement le ressuage et la ségrégation [Gibbs et coll., 1996]. Ces améliorations sont attribuées à une meilleure rétention de l'eau en surface, à la grande finesse des fillers calcaires qui raffinent les pores capillaires bloquant ainsi le mouvement d'eau dans le béton frais et à certaines réactions entre les hydrates du ciment et le CaCO_3 . Le filler calcaire peut également contribuer au contrôle de la prise par la formation de carboaluminate de calcium [Goldman et Bentur, 1993].

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de l'ajout des fillers calcaires sur les performances mécaniques des bétons. Les fillers calcaires contribuent à la formation de monocarboaluminates et à la modification de la microstructure. L'addition du CaCO_3 accélère l'hydratation du C_3S au jeune âge par modification de la surface de ce dernier et de son effet de nucléation.

Les auteurs rapportent qu'avec le filler calcaire, il y a une augmentation des résistances mécaniques au jeune âge due à l'effet accélérateur et à l'effet filler du calcaire. On note que pour une finesse de 300 à 350 m^2/kg , il y a seulement l'effet filler.

En général, Les propriétés physiques du filler calcaire peuvent apporter des effets bénéfiques sur certaines propriétés du béton à savoir :

- Une amélioration des propriétés du béton frais et durci,
- Une accélération de l'hydratation du ciment,
- Une diminution de la demande en eau, ce qui permet de baisser le rapport E/C et augmenter ainsi les résistances,
- Une diminution de la chaleur d'hydratation,
- Une meilleure rhéologie du béton (ciment moins réactif).

« Comme l'indique le thème de notre projet de fin d'étude, nous nous intéressons à une étude basée sur l'ajout des « fillers calcaires ». Le chapitre suivant parle de ces fillers, on a essayé de regrouper toutes les informations trouvées sur ces matériaux minéraux ».

II.4 Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires :

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 durci 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 « Matériaux cimentaires supplémentaires ». 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 cimentaires. [14]

Les trois principaux effets de l'action des additions minérales sont :

- Un effet granulaire agissant sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais,
- Un effet physicochimique et microstructural agissant sur l'évolution de l'hydratation du ciment au cours de la prise et du durcissement,
- Un effet chimique agissant également au cours de l'hydratation du ciment et interagissant fortement avec l'effet physico-chimique et microstructural.

II.4.1 Effet granulaire :

L'effet granulaire concerne toutes les modifications induites par la présence de particules fines ou ultrafines au sein du squelette solide du mélange cimentaire frais en présence d'eau et éventuellement d'adjuvant. D'une part, ces modifications résultent de la capacité d'empilement des particules de l'addition avec les autres grains solides du mélange et, d'autre part, de l'intensité des frictions entre les particules de l'addition et les autres grains solides du mélange.

Ainsi, l'effet granulaire agit dès le malaxage sur toutes les étapes de la mise en œuvre des matériaux cimentaires avec additions (le transport, la mise en place et le serrage) et influe sur la densité du squelette granulaire ainsi que sur la capacité d'écoulement et la stabilité des mélanges frais.

Lorsque les particules des additions modifient peu les frictions intergranulaires dans les mélanges cimentaires, l'effet granulaire peut avoir des conséquences favorables dans la mesure où les particules des additions parviennent à remplir les porosités du squelette granulaire (ciment et granulat), et à libérer l'eau habituellement contenue dans les espaces intergranulaires.

Cet arrangement favorable optimisé conduit, soit à l'amélioration de la consistance du mélange frais du moment que la quantité d'eau reste constante (figure II.5), soit à la réduction de la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance donnée. Dans l'hypothèse où la quantité d'eau est diminuée, la compacité du mélange et ses performances mécaniques sont améliorées.

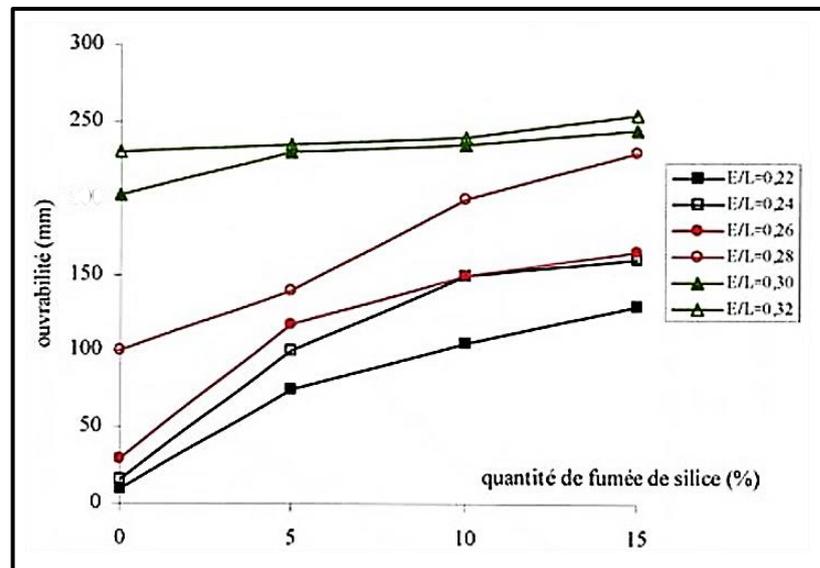


Figure II.5 : Amélioration de la consistance d'un béton en fonction du % du fumée de silice ajoutée pour différentes valeurs du rapport Eau / Liant, selon Kwan [14]

II.4.2 Effet physico-chimique et microstructural :

L'effet physico-chimique et microstructural concerne les modifications induites par la présence des particules d'additions minérales sur le processus d'hydratation du ciment et sur la structuration des produits hydratés.

Il n'est plus à démontrer, que les additions jouent le rôle de site de nucléation hétérogène au cours des réactions d'hydratation du ciment, permettant une meilleure répartition des produits hydratés et conduisant ainsi à une structuration plus efficace de la matrice cimentaire.

Pour les additions calcaires, par exemple, la présence de carbonate de calcium (CaCO_3) favorise l'hydratation du C_3S dès le premier instant, et ceci d'autant plus que les particules sont fines et que la quantité de CaCO_3 est grande (jusqu'à 15 à 20% en masse).

II.4.3 Effet chimique :

L'effet chimique concerne la capacité des additions, caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui contribuent à la résistance mécanique au même titre que les produits hydratés du ciment. Cet effet bénéfique est fonction de nombreux paramètres et peut se manifester à différents âges en fonction de la composition chimique ou minéralogique de l'addition, de sa surface spécifique et du type de ciment.

II.5 L'intérêt de l'utilisation des produits minéraux dans le génie civil :

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 les propriétés mécaniques, physiques et durabilité des bétons.

II.5.1 Intérêt du point de vue économique :

Des sous-produits industriels tels que les cendres volantes et fumées de silice condensées sont de plus en plus utilisées dans les pays industrialisés parce qu'ils sont des déchets d'usine. Contrairement aux pouzzolanes naturelles, il n'est pas nécessaire de les pulvériser ou de les soumettre à un traitement thermique avant de s'en servir. Plusieurs pays comme la Chine, la Grèce, l'Italie, l'Inde et le Mexique, utilisent encore des millions de tonnes de pouzzolanes naturelles pour fabriquer des ciments Portland composés. [13]

Pour des raisons d'épargne d'énergie, il y a tout lieu de croire que l'utilisation de ces matériaux se poursuivra et se développera de plus en plus.

C'est aussi que L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts. En effet, le clinker étant obtenu par transformation de la crue (argile + calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction de cet ajout.

II.5.2 Intérêt du point de vue technique :

L'intérêt technique de ces matériaux minéraux réside en premier lieu dans le fait qui'ils permettent l'obtention d'un béton dont les performances sont aussi bonnes que celles d'un béton ordinaire (sans additions).

Le remplissage des vides est lui-même aussi responsable de la durabilité du béton. En effet, les actions chimiques sont réduites quand la portlandite est moins abondante, soit qu'elle est diluée (ciment au laitier), soit qu'elle est consommée (ciment au cendre ou à la pouzzolane naturelle). La réduction de la teneur en clinker s'accompagne par ailleurs d'une réduction proportionnelle du taux de C_3A du mélange et par conséquent du risque de dégradation sulfatique.

Certains avantages techniques que présente l'utilisation des pouzzolanes dans le béton ne peuvent pas être atteints lorsqu'un CPA (ciment portland) est utilisé seul. Parmi ces avantages, mentionnons une plus grande ouvrabilité, une maniabilité accrue, une meilleure étanchéité à l'eau (l'ajout rend le béton plus compact), une réduction de la chaleur d'hydratation et des risques de fissuration sous l'effet de l'action thermique et une plus grande durabilité au milieu sulfaté ou acide [13].

II.6 L'utilisation des matériaux minéraux en Algérie :

L'incorporation des additions minérales est maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du béton telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc. Ces additions minérales affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance, la durabilité des matériaux durcis.

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El-Hadjar, le calcaire

et la pouzzolane naturelle de Béni-Saf. Le (tableau II.4) donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes.

Tableau II.4 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [13]

Entreprise	Cimenterie	Ajouts utilisés
ERCE	Ain Touta	Laitier + calcaire
	Ain El Kebira	Laitier + pouzzolane
	Hamma Bouziane	Laitier + calcaire
	H'djar Essaoud	Laitier
	Tebessa	Laitier
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raïss Hamidou	Poussière
	Sour El GHozlane	Calcaire / Tuf
ECDE	Chelf	Calcaire
ERCO	Béni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	

II.7 Conclusion :

De nos jours, il est impossible de confectionner un béton spécial (BHP, BAP) sans l'introduction de produits additifs conduisant à améliorer certains de ses propriétés.

L'utilisation des sous-produits minéraux est en train de devenir un devoir national et un impératif économique dans certains pays. L'industrie du ciment et du béton s'est intéressée à cette nouvelle orientation en utilisant certains de ces produits au cours du processus de fabrication du ciment ou du béton.

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 II.6, 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 [15].

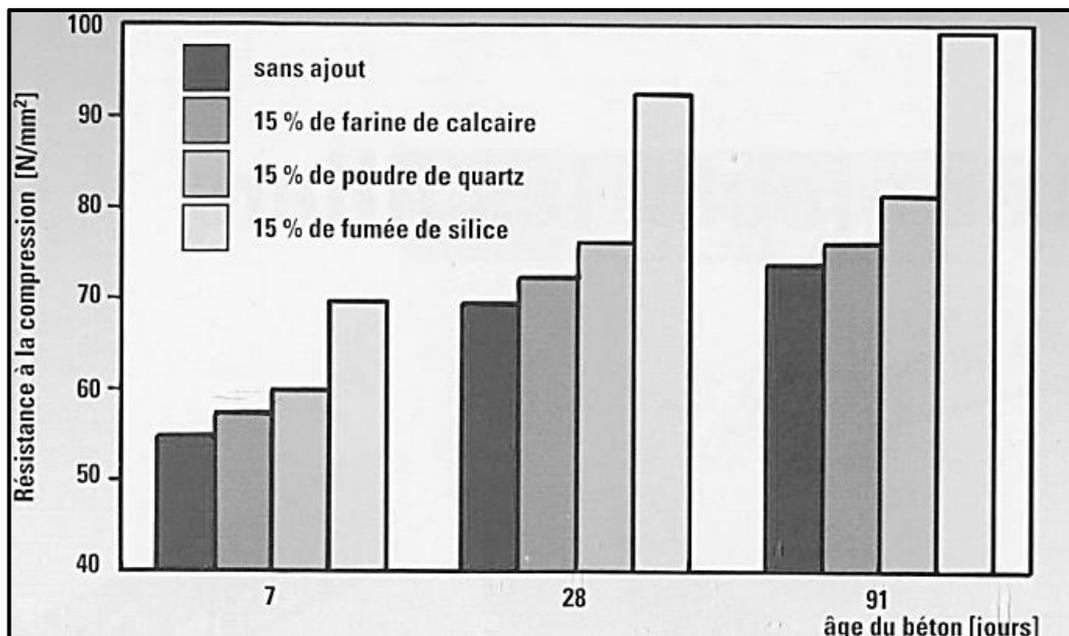


Figure II.6 : Développement de la résistance à la compression de béton contenant des ajouts selon [15]

Chapitre

III

Les fillers calcaires

Chapitre III

Les fillers calcaires

III.1 Introduction :

Aujourd'hui, la production des bétons de résistance caractéristique à 28 jours supérieur à 50 MPa est très fréquente dans le monde.

C'est grâce à l'emploi des additions minérales (cendres volantes, fumée de silice, laitier, fillers calcaires, ...) que les bétons sont devenus encore plus résistants et plus durables.

L'intérêt de notre étude expérimentale est focalisé sur le rôle joué par les fillers calcaires dans le béton. « **C'est quoi ces fillers calcaires ? ..., avec ces fillers : quel avenir dans les bétons ?** ».

Dans le domaine du génie civil, les fillers sont des : « Produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, diatomite, bentonite, cendres volantes, ...) naturelles ou non, agissant principalement, grâce à une granularité appropriée, par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité, diminution de la perméabilité et de la capillarité, ...). Les fillers sont inertes s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau, ils sont actifs s'ils ont, même partiellement, des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques en présence de ciment et d'eau ». Leur principal intérêt est de diminuer le coût global du matériau. Le taux de substitution au ciment peut atteindre 30 %, ils modifient la rhéologie du béton frais, tout en exerçant un rôle de comblement de la porosité. Ils interviennent alors en tant qu'ajout par rapport au liant dans la composition du béton. Cette utilisation nécessite la présence d'un adjuvant organique dont la fonction principale est d'éviter le surdosage en eau tout en conservant la maniabilité du béton.

F. de Larrard et J.P. Bombléd montrent que les fillers sont indispensables pour la confection de bétons hautes performances. Ils agissent comme correcteur de la granulométrie (l'empilement granulaire plus compact) et comme un apport d'une cohésion intergranulaire. [16]

L'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du ciment et du béton est assez récente, ces fillers sont soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et peuvent alors contenir des résidus argileux et des matières organiques, soit obtenus par broyage du matériau cru, ils confèrent certaines propriétés rhéologiques au béton frais qui lui garantissent une meilleure durabilité, L'objectif dans leur utilisation est donc d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance.

III.2 Définition du filler calcaire en tant qu'addition minérale :

Un filler calcaire est une fine minérale obtenue par broyage d'une roche calcaire, c'est la poussière émanant de l'exploitation de la roche calcaire est appelée '**filler calcaire**'.

L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement, s'insère dans le squelette granulaire du ciment (Figure III-1) et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

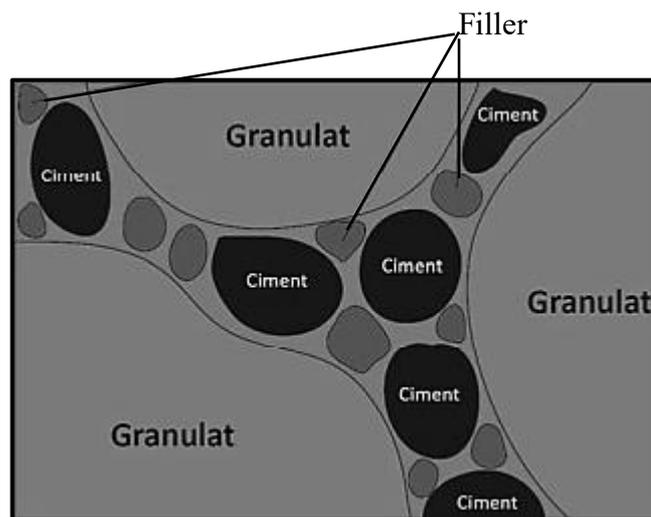


Figure III.1 : illustration de l'effet filler [19]

Les additions calcaires sont des additions de Type I classées comme quasiment inertes. Les critères qui les définissent dans la norme NF P18-508 représentent des propriétés physiques et chimiques (Tableau III-1, Tableau III-2).

Tableau III.1 : Critères sur les propriétés physiques, cités par [19]

Propriétés	Passant à 63µm	Surface spécifique de Blaine
Critères	> 63%	> 2000 cm ² / g

Tableau III.2 : Critères sur les propriétés chimiques, cité par [19]

Propriétés	Indice d'activité	Teneur CaCO ₃	Valeur de bleu	Teneur en sulfate
Critères	> 0.68	> 62%	< 1.3g / 100g	< 0.15 %

La normalisation des additions pour béton hydraulique tolère maintenant l'utilisation des additions de type I et II dans le béton hydraulique au même titre que les autres constituant du béton. La norme française XP 18-305 sur les BPE (béton prêt à l'emploi), par exemple permet l'utilisation des additions en substitution partielle du ciment CPA-CEM I classe 42.5 et plus. Dans ce cas, la quantité du liant équivalent du béton L_{eq} (Kg / m³) prenant compte l'apport des additions au même titre que le ciment est définie par la formule :

$$\text{Liant équivalent} = L_{eq} = C + kA \quad (\text{Eq III.1})$$

Avec :

C : dosage en ciment en Kg / m³

A : quantité de l'addition en Kg / m³

K : coefficient de prise en compte de l'addition à condition que l'indice d'activité de l'addition calcaire soit supérieur à 0,71

III.3 Le concept du coefficient K : applicable aux fillers calcaires ?

Pour garantir une durée de vie suffisante aux ouvrages en béton, des exigences sont imposées à sa formulation, à savoir le respect d'un dosage minimal en ciment et d'un rapport maximal eau/ciment. Lorsque des additions minérales, dites à caractère hydraulique ou pouzzolanique, sont incorporées dans les bétons, elles participent aux réactions d'hydratation de la matrice cimentaire. C'est ainsi que la normalisation actuelle sur les bétons - la norme européenne EN 206-1 autorise la prise en compte de certaines additions pour le respect des exigences relatives à la formulation du béton. Cette pratique se fait via l'introduction d'un 'coefficient k' qui quantifie l'activité liante de l'addition minérale et permet de déterminer la quantité d'addition qui participe aux réactions d'hydratation, au même titre que le ciment.

[18]

Les additions concernées sont les cendres volantes, les fumées de silice et les laitiers moulus de haut fourneau.

En ce qui concerne les fillers calcaires, la situation est très différente. Malgré plusieurs études qui s'accordent sur le fait que les fillers calcaires contribuent au durcissement du béton, le concept du coefficient k n'est pas encore d'application. En France, par contre, la norme NF EN 206-1 associe un coefficient k de 0,25 à certains fillers calcaires lorsqu'ils sont utilisés avec un ciment Portland de type CEM I.

Concrètement, lorsque les exigences de durabilité liées au lieu d'utilisation du béton indiquent un dosage en ciment d'au moins 320 kg par m³ de béton, l'usage d'un coefficient k de 0,25 permet de réduire cette quantité de 25 kg, en cas d'ajout de 100 kg de filler calcaire.

III.4 La problématique de la demande en eau :

L'eau dans le béton joue un double rôle : elle est nécessaire pour hydrater le ciment, mais aussi pour assurer la maniabilité du béton à l'état frais. En général, l'augmentation de la quantité de particules fines dans un béton accroît la demande en eau pour le maintien de son ouvrabilité, puisqu'il faut davantage d'eau pour enrober et donc lubrifier les grains. Dans la mesure où cet ajout d'eau se fait au détriment des résistances mécaniques du béton, et que les superplastifiants (adjuvants fluidifiants) sont des produits relativement onéreux pouvant conduire à des effets secondaires en cas de surdosage, il convient de limiter le besoin en eau des fillers calcaires.

Il faut distinguer les fillers qui sont mélangés au ciment, de ceux qui sont utilisés comme adjuvants minéraux dans les bétons :

III.5 Les fillers calcaires dans les ciments :

Les fillers calcaires entrent dans la composition des CPJ avec des teneurs qui n'excèdent pas 25 % en poids de substitution. La fabrication de ces ciments est réalisée par cobroyage (broyage simultané des matériaux dans le broyeur). Du fait de leur différence de "broyabilité", clinker et calcaire co-broyé n'auront pas les mêmes granulométries. [16]

- Broyabilité du clinker: 70 cm².J⁻¹
- Broyabilité du calcaire: 160 cm².J⁻¹

Compte tenu de leur différence de broyabilité, le cobroyage ne peut pas optimiser les granulométries des deux constituants.

Au sujet de la réactivité des fillers calcaires toutes les études s'accordent sur les points suivants :

- La précipitation de carboaluminates lors de l'hydratation ;
- La substitution partielle de l'ion sulfate par l'ion carbonate lors de la formation d'ettringite. Un nouvel hydrate peut se former et les séquences réactionnelles de l'hydratation ne sont pas modifiées. Il serait possible de substituer en partie le gypse par du filler calcaire.
- L'interaction entre les silicates calciques et le filler, Le carbonate de calcium accélère l'hydratation du silicate tricalcique et modifie le rapport Ca/Si des hydrates silicatés (C-S-H).

Certains auteurs, qui étudient les résistances de ciments fillérisés en pâtes pures et en mortiers montrent que les résistances chutent avec l'augmentation du pourcentage de fillers. Parallèlement P. Gegout et al ont obtenu des résultats qui contredisent les précédents et remarquent l'influence déterminante du rapport E/C. Pour M. Regourd la diminution du rapport E/C dans les pâtes pures et dans les mortiers à base de ciments fillérisés conduit à former une microstructure plus compacte, ce qui va dans le sens d'une amélioration des résistances mécaniques.

III.6 Les fillers calcaires dans les bétons :

Le filler calcaire modifie la rhéologie du matériau et corrige la granulométrie de l'ensemble des composants du béton.

Ces actions conjuguées avec l'effet des adjuvants organiques, rendent le béton plus maniable tout en maintenant la cohésion intergranulaire.

Grâce à une meilleure ouvrabilité du béton et à la présence des particules fines qui comblent les vides, l'empilement granulaire est plus compact. Le béton possède de ce fait de meilleures performances mécaniques, sa porosité est diminuée et donc a priori sa durabilité devrait être améliorée.

Les fillers calcaires confèrent certaines propriétés rhéologiques au béton frais qui lui garantissent une meilleure durabilité [F. De Larrard]

III.7 Influence des fillers calcaires sur les propriétés des bétons :

Pour certains chercheurs, un filler calcaire n'est pas totalement un filler inerte car il peut réagir avec le C₃A pour former des carboaluminates. Goldman et Bentur (1993) et Venuat (1995) ont montré que les fillers calcaires accélèrent quelque peu l'hydratation du C₃S. En outre, Nehdi et al. (1996) ont trouvé que des particules de fillers calcaires pouvaient servir de sites de nucléation favorisant la croissance de C-S-H. [10]

Si un filler 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).

III.7.1 Caractéristiques du filler calcaire influençant les propriétés des bétons :

III.7.1.1 A l'état frais :

Les fillers calcaires sont composés de particules de dimensions inférieures à 125 μ m, leur surface spécifique va donc jouer un rôle prépondérant sur l'écoulement du béton [Legrand, 1971].

La rhéologie des pâtes, des bétons dépend de la qualité du filler et de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura une réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe, mais des résultats contradictoires apparaissent selon la définition donnée à la finesse et la relation avec la demande en eau du béton. En effet, à l'échelle de la suspension de filler, Michel et al [Michel, 2007], montrent une relation directe entre la demande en eau mesurée par l'intermédiaire du β_p (demande en eau déterminée à partir d'une combinaison de mesures d'étalement sur pâtes à teneur en eau variable [Filltech, 2007]) et la surface spécifique BET (abréviation du nom de ses inventeurs Brunauer, Emmet et Teller).

On peut ainsi observer une augmentation de la demande en eau avec une augmentation de la surface spécifique BET (Figure III-2).

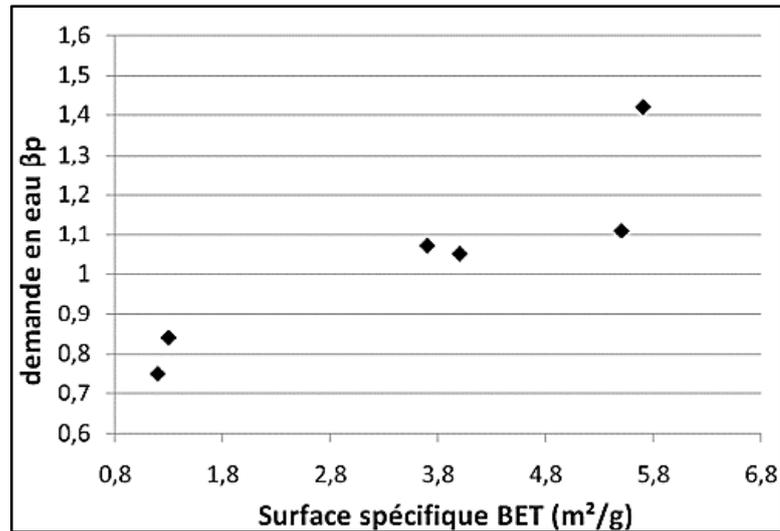


Figure III.2 : relation entre la demande en eau d'un filler et sa surface spécifique BET [Michel, 2007] [19]

Cette demande en eau plus importante induite par une surface spécifique plus importante du filler calcaire va alors influencer sur les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires.

En effet, plusieurs recherches montrent que l'augmentation de la surface spécifique du filler (mesurée par la technique BET ou Blaine) entraîne une altération des propriétés rhéologiques (à teneur en eau fixée) que ce soit à l'échelle de la pâte, du mortier [Michel, 2007], [Billberg, 1999] ou du béton [Nehdi, 1998], [Esping, 2008].

L'utilisation d'un filler permet par définition de combler les vides entre les grains de dimensions plus importantes du ciment. Cela conduit à la réduction de la demande en eau de la pâte de ciment ainsi obtenue [Jones, 2003].

Les impuretés et plus spécialement les argiles contenues dans le filler, généralement négligées, influent également sur les propriétés d'écoulement des bétons [Filltech, 2007] (Figure III-3). Il est en effet montré qu'une teneur plus importante en argiles dans le filler peut entraîner des pertes d'écoulement à l'échelle du mortier en raison d'une demande en eau accrue de ces fillers en fonction de la teneur en argiles [Michel, 2007].

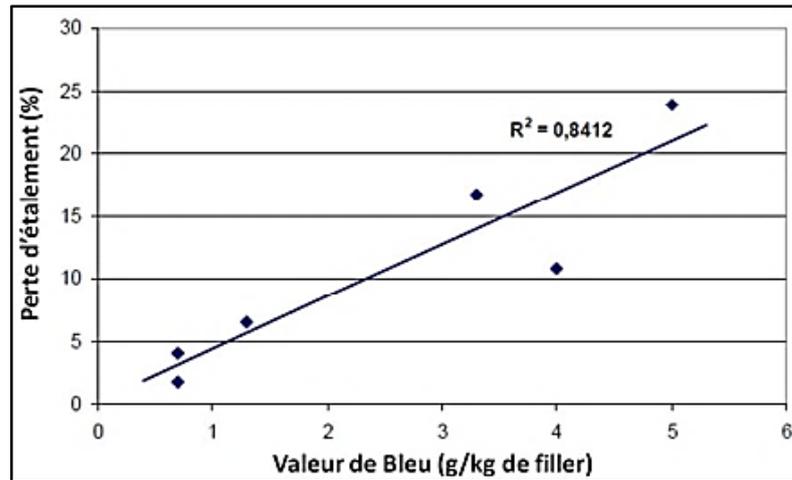


Figure III.3 : Perte d'étalement par rapport au mortier de référence (0% de filler) en fonction de la teneur en argiles des fillers (35% de filler en masse de ciment)

[Filltech, 2007] [19]

Donc il est important de signaler que la présence de fines d'argiles dans le filler peut augmenter la demande en eau.

D'un côté, il est montré un accroissement de la demande en eau en fonction de la finesse (surface spécifique) alors que de l'autre, on constate une diminution de la demande en eau en fonction de la finesse. Il faut donc pouvoir prendre en compte le plus grand nombre de propriétés (finesse, morphologie, composition) des fillers, afin d'apprécier leurs interactions avec le ciment.

III.7.1.2 A l'état durci :

a- Résistance mécanique :

Il est montré que l'utilisation de filler permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges cimentaires (pâte, mortier, béton). Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler et le maximum de résistance est généralement atteint avec un taux de substitution de 10% [Michel, 2007], [Topçu, 2003], [Felekoglu, 2007].

Une augmentation de la finesse du filler permet d'améliorer les résistances des mélanges cimentaires sur mortier [Lawrence, 2000].

Cette influence positive du filler sur les résistances mécaniques des bétons peut être expliquée par deux phénomènes. Tout d'abord, l'ajout de filler fin permet d'améliorer la densité de la matrice générale du béton et plus spécifiquement de la zone de transition pâte-granulats [Boziljkov, 2003].

D'un autre côté, bien que qualifié d'addition inerte, le filler calcaire influe sur l'hydratation du ciment en servant de site de nucléation [Ye, 2007] mais également en modifiant les produits d'hydratation formés [Kakali, 2000], [Xiong, 2003], [Péra, 1999], [Husson, 1992].

En effet Bonavetti et al [Bonavetti, 2001] montrent que dans une pâte de ciment contenant du filler calcaire, les analyses DRX (Diffraction des rayons X) mettent en évidence trois phases :

- De 1 à 7 jours, formation de carboaluminate hydraté, d'ettringite et diminution de la quantité de CaCO_3 ;
- De 7 à 28 jours, transformation de l'ettringite en aluminate hydraté, stabilisation de la formation de carboaluminate hydraté ;
- Après 28 jours, l'excès d'ions carbonate en solution entraîne la transformation du sulfoaluminate hydraté en carboaluminate hydraté (plus stable [Zhang, 1980], l'augmentation des sulfates en solution entraîne la reconversion de sulfoaluminate hydraté en ettringite.

Les fillers calcaires accélèrent le degré d'hydratation du ciment (Figure III.4) et de ce fait l'action positive du filler sur les résistances est essentiellement marquée en ce qui concerne les résistances au jeune âge (entre 1 et 7 jours) [Escadeillas, 1988] et a tendance à être négligeable au long terme [Zhu, 2004], [Voglis, 2005].

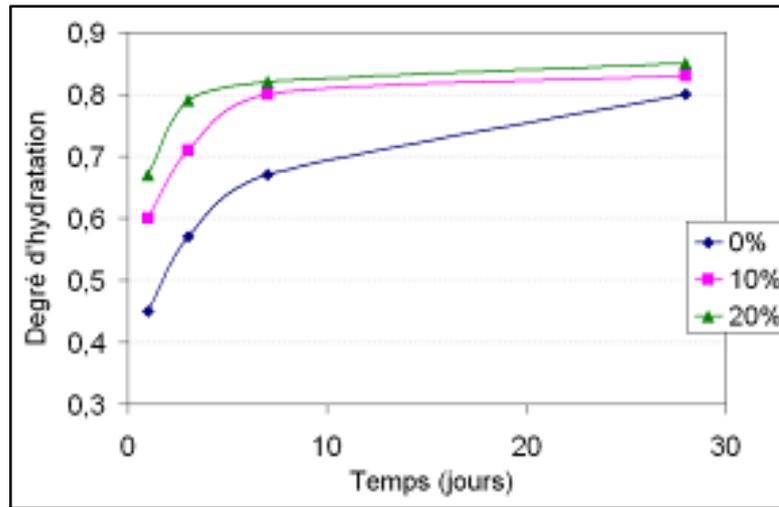


Figure III.4 : Evolution du degré d'hydratation en fonction du dosage en filler (0, 10, 20%) [Bonavetti, 2003]

Selon F. de Larrard [17], l'effet des additions calcaires sur les propriétés du béton durci peut avoir une origine physique ou une origine chimique. Cet auteur a proposé une synthèse de l'effet des additions calcaires sur la résistance en compression :

- **Effet d'accélération :**

Au niveau de la matrice (la pâte de ciment durcie présente dans les interstices des granulats), les additions calcaires tendent à accélérer l'hydratation du ciment Portland. Les additions calcaires jouent le rôle de sites de nucléation préférentiels au cours des réactions d'hydratation du ciment, engendrant une meilleure répartition des hydrates, en particulier de la portlandite, dans la pâte de ciment durcie. La présence de CaCO_3 accélérerait l'hydratation du C_3S dès les premiers instants et d'autant mieux que les particules sont fines et la quantité de CaCO_3 grande (jusqu'à 15 à 20%). Cet effet est sensible à la surface spécifique des additions, et tend à devenir négligeable après 28 jours. Son amplitude est également liée à la vitesse de durcissement du ciment, à l'âge considéré. Ainsi, un ciment réputé « lent » présente généralement un accroissement de résistance important entre 7 et 28 jours, et répondra donc davantage qu'un ciment à durcissement rapide, pour la période considérée.

- **Effet liant :**

Toujours au niveau de la matrice, un autre effet favorable à la résistance est constitué par la possibilité pour les additions de former au contact de la phase aluminatée des composés appelés carboaluminates, qui contribueraient à la résistance mécanique au même titre que les autres hydrates. Cet effet semble insensible à la surface spécifique, et se manifeste à tout âge (au moins à partir de 7 jours). Il dépend bien sûr directement de la teneur du ciment en C_3A .

Les additions calcaires participent ainsi aux réactions d'hydratation du ciment qui fait que l'on attribue à ces additions une activité "liante" ou hydraulique.

En particulier, $CaCO_3$ et les aluminates du ciment (C_3A , C_4AH_{13} , ...) réagiraient chimiquement en présence d'eau pour former un mono-carboaluminate de calcium hydraté $C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$, qui cristallise en fines plaquettes hexagonales. La quantité de carboaluminates formée dépend des teneurs en C_3A , en $CaCO_3$ et de la finesse. De plus, il se formerait aussi une solution solide C-S-H - $CaCO_3$: les C-S-H seraient modifiés d'un point de vue composition (il a été constaté que le rapport C/S augmentait lentement avec l'addition de $CaCO_3$ dans le mélange) et morphologie, et il apparaîtrait une zone de transition entre addition et pâte de ciment.

- **Effet d'écartement des granulats :**

L'ajout d'additions dans un béton, à teneurs en ciment et en eau constantes, entraîne une augmentation du volume de la matrice, et donc une diminution du volume de granulat. Or, à même nature de matrice, la résistance en compression est sensible à l'épaisseur maximale de pâte (EMP [de Larrard et Tondat 1993]), définie comme la distance moyenne entre deux gros gravillons adjacents. Plus cette distance augmente, et plus la résistance diminue. Ce troisième effet de l'incorporation d'additions est négatif.

- **Effet de stabilisation par diminution du ressuage :**

L'ajout d'additions calcaires dans un béton maigre tend à augmenter significativement la surface spécifique de la phase solide du matériau frais. Le ressuage, qui intervient pendant la période dormante, est réduit d'autant. Or, ce ressuage, s'il diminue le rapport eau/ciment moyen, conduit à une accumulation d'eau sous les granulats, très défavorable à l'adhérence entre les phases.

On peut donc penser que l'effet du ressuage est globalement négatif, ce qui conduit donc à un effet bénéfique d'une incorporation d'additions.

b- Durabilité :

La durabilité des bétons peut être reliée en grande partie à la pénétration d'agents nocifs (CO_2 , chlorure...). L'étude de la perméabilité des bétons contenant des fillers calcaires est donc un point essentiel si l'on veut étudier leur comportement à long terme.

Boel et al [Boel, 2007] trouvent une perméabilité au gaz plus importante pour les bétons contenant du filler calcaire.

Les résultats trouvés pour la perméabilité et la sorptivité à l'eau varient suivant les recherches effectuées. En effet, [Tsvivilis, 2000], [Tsvivilis, 2003], [Boel, 2007] montrent que l'ajout de filler n'influe pas sur ces deux caractéristiques alors que [Zhu, 2003] trouvent des valeurs légèrement inférieures pour les bétons fillerisés.

F. de Larrard et J.P. Bomblet montrent que les fillers agissent comme un correcteur de la granulométrie, (ils sont ajoutés à la composition du béton pour rendre l'empilement granulaire plus compact), et un apport d'une cohésion intergranulaire. Ces deux fonctions du filler diminuent la porosité du matériau durci et donc améliorent ses résistances et sa durabilité. [17]

Une attention particulière doit être apportée au risque de dégradation du béton par des sulfates, induite par la formation de sels expansifs tels que la thaumasite (un minéral silicate à formule chimique), le gypse et l'ettringite secondaire. Ces produits expansifs, formés dans la pâte de ciment durcie, entraînent des tensions internes pouvant conduire à une fissuration, voire un éclatement du béton. La probabilité de voir se produire ce type de dégradation augmente si des fillers calcaires sont utilisés, car ces produits sont essentiellement constitués de carbonate de calcium CaCO_3 dont les ions interviennent dans les réactions de formation de la thaumasite.

III.8 Conclusion :

Les ciments aux additions minérales sont de plus en plus utilisés dans l'industrie du béton pour plusieurs raisons à savoir : écologiques, économiques ou pour améliorer certaines propriétés du béton frais ou durci. C'est le cas des fillers calcaires qui ajoutés au ciment Portland peuvent en général accélérer l'hydratation du ciment avec comme conséquence, une amélioration des résistances à la compression à jeune âge. Du point de vue chimique, les fillers calcaires n'ont pas des propriétés pouzzolaniques, mais dans certains cas selon la nature du ciment, ils peuvent réagir avec les aluminates du ciment.

Le principal avantage des fillers calcaire est de réduire le coût final unitaire du ciment en réduisant son contenu énergétique. De plus, l'addition de fillers calcaire au clinker permet d'augmenter significativement la capacité de mouture des broyeurs, et d'améliorer les propriétés physiques du béton, à savoir l'ouvrabilité du béton frais, tout en permettant de densifier la matrice de béton en retenant de l'eau. Les auteurs ont fait ressortir clairement que la densité du béton (et donc sa compacité) augmente avec l'augmentation de la quantité de fillers. Or un gain de compacité s'accompagne toujours d'un gain de résistance.

F. De Larrard, a mentionné que les fillers calcaires confèrent certaines propriétés rhéologiques au béton frais qui lui garantissent une meilleure durabilité. [17]

Les propriétés physiques des fillers ont une influence prépondérante sur leurs comportements, que ce soit seul ou avec d'autres constituants, ces propriétés, induites à la fois par la nature de la roche et le processus de fabrication. Leur finesse et leur morphologie influent sur la demande en eau, sur les propriétés rhéologiques, sur leur insertion dans le squelette granulaire du ciment et donc sur l'existence et l'intensité de l'effet filler. Il s'agit alors d'avoir une image aussi précise que possible de ces propriétés.

Chapitre

IV

Formulation des bétons
courants et bétons HP

Chapitre IV

Formulation des bétons courants et bétons HP

IV.1 Introduction :

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de l'élément d'ouvrage en cause.

Les méthodes proposées sont nombreuses, elles aboutissent à des dosages volumétriques ou, de préférence pondéraux. Le passage de l'un à l'autre pouvant se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats. Parmi ces méthodes les plus connues on peut citer celles de BOLOMEY, de FAURY, de VALETTE, de JOISEL et en fin la méthode pratique dite DREUX-GORISSE.

Ces méthodes sont dites à « granularité continue » lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne, sur le graphique granulométrique, une courbe s'élevant d'une façon continue, autrement dit du plus petit grain de ciment ($d_c = 6,3$ microns) aux plus gros grains (D) des graviers, toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées (**exemple :** béton constitué d'un sable 0/5 mm et de deux graviers 5/25 mm et 20/40 mm, courbe A sur la Figure (IV.1). [20])

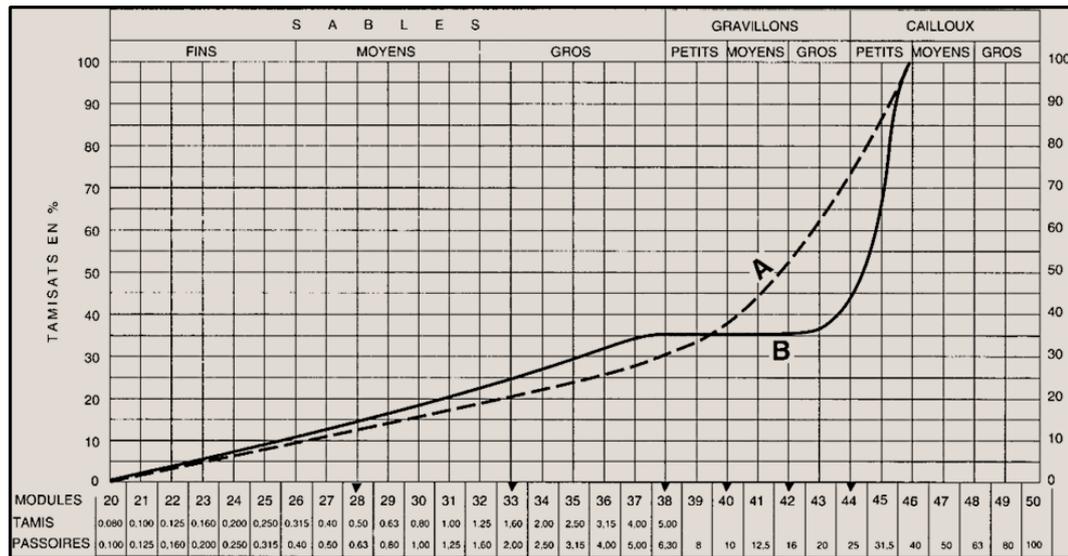


Figure IV.1 : Analyse granulométrique, courbes granulaires continues (A) et discontinues (B) pour des bétons pour lesquels D = 40mm. [20]

La granularité continue permet d'obtenir des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité. Par contre, la granularité discontinue conduit à des bétons à maximum de gros éléments et minimum de sable présentant en général des résistances en compression un peu supérieure mais parfois au détriment de l'ouvrabilité. Cependant, on peut estimer que pratiquement la plupart des bétons actuellement utilisés sont à granularité continue.

Les méthodes habituelles de formulation de béton, notamment celle de Dreux-Goriss, restent destinées aux bétons ordinaires qui généralement, n'exigent que des dosages en ciments inférieurs à 450kg/m³, et des rapports E/C supérieures à 0,4 toute en offrant un affaissement maximal de 12cm. Pour la formulation des BHP, d'autres méthodes ont été développées, entre autre la méthode de Sherbrooke et la méthode de Baron-Lesage, qui consistent globalement à fixer des paramètres de départ (E/C, ciment...) et de cibler à travers plusieurs gâchées d'essai la maniabilité et la résistance souhaitées.

IV.2 Les caractéristiques recherchées pour un béton :

Le béton est un matériau facile à mouler quelles que soient les formes de l'ouvrage, à l'épreuve du temps, économique, résistant au feu et nécessitant peu d'entretien. Matériau composite, mis en œuvre de multiples manières, il répond à un grand nombre de spécifications : résistance mécanique, notamment à la compression, isolation thermique et phonique, étanchéité, aspect, durabilité, sécurité incendie. Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés: d'une part à l'état frais, alors qu'il est plastique et qu'on peut le travailler; d'autre part, à l'état durci, alors que sa forme ne peut plus être modifiée mais que ses caractéristiques continuent à évoluer durant de nombreux mois, voire des années. [2]

IV.2.1 Le béton frais :

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend apte à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés. L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures.

De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité : type et dosage en ciment, forme des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau. Il ne faut cependant pas considérer que le dosage en eau peut être augmenté au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'améliorer l'ouvrabilité. Un excès d'eau se traduit, entre autres inconvénients, par un phénomène de « ressuage », qui est la création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation. Les autres conséquences d'une trop forte teneur en eau sont :

- La diminution de la compacité et, corrélativement, des résistances ;
- Une porosité accrue ;
- Un risque de ségrégation des constituants du béton ;
- Un retrait augmenté ;
- Un état de surface défectueux se traduisant notamment par du bullage.

La teneur en eau doit être strictement limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité et d'hydratation du ciment.

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance; sa mesure peut être effectuée facilement sur chantier avec la méthode du cône d'Abrams ou « slump test », qui est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique. [2]

La norme NF EN 206-1 définit cinq classes de consistance.

Tableau IV.1 : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams – norme NF EN 206-1

Classe	Consistance du béton	Affaissement (en mm) au cône d'Abrams
S1	Ferme	10-40
S2	Plastique	50-90
S3	Très plastique	100-150
S4	Fluide	160-210
S5	Très fluide	≥ 220

IV.2.2 Le béton durci :

IV.2.2.1 La porosité :

Une caractéristique essentielle du béton durci est sa porosité, rapport du volume des vides au volume total. Les études de Féret (début du xx^e siècle) avaient déjà établi le lien entre la porosité du béton et sa résistance. L'importance de cette caractéristique sur la résistance du béton aux agents agressifs, sur la carbonatation et sur la tenue au gel a été démontrée depuis. C'est donc un facteur déterminant de la durabilité du béton.

La recherche d'une porosité minimale doit nécessairement passer par :

- L'augmentation de la compacité du béton frais grâce à une bonne composition du béton et à des moyens de mise en œuvre adaptés, les compacités réellement atteintes sur chantier ne dépassent guère 0,850 : dans 1 m³ de béton très bien préparé et vibré par des moyens puissants.
- L'augmentation du dosage en ciment et le choix de son type ont une influence favorable sur la diminution de la porosité, les hydrates formés par l'hydratation du ciment ont un rôle essentiel de colmatage des capillaires.

On améliore la compacité du béton en jouant sur la granulométrie des granulats dans la fraction des éléments fins, et sur la réduction d'eau.

La faible porosité d'un béton présente des avantages déterminants sa durabilité.

- Un béton en contact avec un milieu agressif (eaux séléniteuses, eau contenant des acides organiques) subira une attaque beaucoup plus lente si les capillaires du béton sont moins nombreux et plus fins.

- Dans le cas du béton armé, une faible porosité est indispensable, pour protéger les armatures contre les risques de corrosion.

IV.2.2.2 Les résistances mécaniques :

Une bonne résistance à la compression est la performance bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette résistance est généralement caractérisée par la valeur mesurée à vingt-huit jours. On a pu voir précédemment que la résistance dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier le type et le dosage du ciment, la porosité du béton et le facteur E/C, rapport du dosage en eau au dosage en ciment.

Parmi les formules qui permettent de prévoir les résistances, celle de Féret est la plus connue.

$$R = K \left(\frac{C}{C+E+V} \right)^2 \quad (\text{Eq IV.1})$$

R : résistance du béton.

K : coefficient de la classe de ciment, du type de granulats et du mode de mise en œuvre.

C : dosage en ciment.

E : dosage en eau.

V : volume d'air subsistant.

Cette formule montre l'intérêt que présente la diminution de la quantité d'eau de gâchage et de l'air, ce qui réduit la porosité et par conséquent augmente la résistance.

Les résistances mécaniques du béton sont contrôlées par des essais destructifs ou non destructifs.

- Lors des essais destructifs, la résistance à la compression peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes généralement cylindriques, la plus courante est l'éprouvette de diamètre 16 cm, hauteur 32 cm, confectionnées avec le béton destiné à l'ouvrage à contrôler.
- Les essais non destructifs peuvent utiliser le scléromètre, appareil basé sur le rebondissement d'une bille d'acier sur la surface à tester, ou des instruments de mesure de la vitesse du son à travers du béton (4000 m/s pour un béton courant).

IV.2.2.3 La durabilité :

Un béton durable est un béton compact (présentant une faible porosité) dont les constituants de qualité ont été bien choisis conformément aux normes. Cependant, quelles que soient les précautions prises pour adapter et optimiser sa formulation, il ne pourra assurer sa fonction durablement que si les « règles de l'art » ont été respectées lors de sa fabrication (malaxage efficace adapté à la formulation, respect des tolérances sur les constituants) et de sa mise en œuvre (vibration correcte, cure adaptée, prise en compte des conditions climatiques lors du bétonnage, retraits maîtrisés, respect des valeurs d'enrobage des armatures, etc.). Pour obtenir la durabilité spécifiée, il convient de respecter les recommandations ou les normes d'exécution des ouvrages, ou les normes des produits préfabriqués ainsi que la norme NF EN 13369 pour les produits structuraux.

La durabilité du béton est liée à la résistance aux agressions physico-chimiques du milieu environnant (milieu humide, milieu marin, effet du gel, pollution atmosphérique, etc.) et aux sollicitations mécaniques de l'ouvrage.

IV.3 Comment déterminer la composition du béton ?

L'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par l'adoption et l'optimisation de sa formulation aux exigences appropriées à l'ouvrage et à son environnement. C'est la raison pour laquelle la démarche retenue comporte les plus souvent deux phases.

- Approche d'une composition, soit de façon graphique à partir de méthodes telles que celle de Faury ou de Dreux, soit de façon expérimentale (par exemple à partir de la méthode LCPC de Baron et Lesage). Il faut préciser que ces différentes méthodes sont basées sur la recherche d'une compacité maximale conformément aux théories de Caquot sur la composition granulaire des mélanges, que les connaissances actuelles sur le béton ont confirmées pour l'essentiel.
- La deuxième phase consiste à ajuster expérimentalement cette formulation en fonction des résultats obtenus par des essais effectués en laboratoire (essais d'étude) ou dans les conditions du chantier (épreuves de convenance).

IV.4 L'approche de la formulation :

IV.4.1 Dosage en ciment :

Pour bien comprendre le caractère primordial du dosage en ciment, il faut rappeler que celui-ci remplit deux fonctions essentielles dans le béton.

1- La fonction du liant :

Elle est déterminante dans la résistance du béton, qui dépend de la nature du ciment, de sa propre résistance et de l'évolution de son durcissement.

2- La fonction filler :

Le ciment complète la courbe granulométrique du béton dans les éléments fins. Il faut noter que le développement dans le temps des hydrates du ciment colmate progressivement les capillaires, contribue à diminuer la porosité d'ensemble du béton et améliore notablement sa durabilité.

Les abaques de G. Dreux, exposées au paragraphe suivant, reposent sur cette approche qui privilégie la « fonction liant », donc la résistance. Dans cette démarche, le ratio C/E (dosage en ciment sur dosage en eau) est calculé à partir de la formule :

$$R_{b_{28}} = G R_c (C/E - 0,5) \text{ Expression simplifiée inspirée de la formule de Féret.}$$

R_{b 28} = résistance à la compression du béton à 28 jours.

R_c = résistance réelle du ciment.

G = coefficient compris entre 0,35 et 0,65.

Il faut cependant rappeler que la « fonction filler » conduit à un dosage en ciment supérieur aux valeurs habituellement fixées par les documents normatifs.

IV.4.2 Dosage en eau :

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton. On pressent bien l'influence qu'il a sur la porosité du béton par les vides créés, lorsque l'eau s'élimine pour différentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats). [2]

Par exemple, avec un E/C, couramment utilisé, de 0,55, on estime que la moitié de l'eau de gâchage sert à l'hydratation du ciment, l'autre moitié est une eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en œuvre. L'emploi croissant d'adjuvants contribuant à améliorer la plasticité sans nécessiter une présence d'eau en excès, nuisible aux caractéristiques finales du béton durci.

Toutes ces raisons soulignent l'importance de l'optimisation du dosage en eau, qu'on a tendance à approcher, par exemple en le déduisant de l'expression C/E précédemment adoptée et en l'affinant grâce à des essais pratiqués dans les conditions du chantier, qui ont le mérite d'intégrer des paramètres difficiles à quantifier.

IV.4.3 Choix des granulats :

Une fois déterminée la dimension maximale des granulats compatible avec les exigences géométriques précédemment déterminées de l'ouvrage (espacement des armatures entre lesquelles doit pouvoir passer le béton, épaisseur d'enrobage, forme de la pièce à mouler), on doit résoudre les deux problèmes suivants.

A- Choix des classes granulaires :

La plupart du temps, la composition d'un béton présente une courbe granulaire discontinue obtenue à partir de deux classes granulaires : un sable de type 0/4 et un gravillon 5,6/12,5, 5,6/16 ou 5,6/20, par exemple. On peut également utiliser deux classes de gravillons dans des compositions plus élaborées, lorsqu'on cherche à se rapprocher d'une granulométrie continue. Pour répondre à des performances particulières, il existe des bétons spéciaux qui font appel à davantage de classes.

B- Choix des granulats :

Deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les propriétés du béton :

- La proportion relative gravillons/sable traduite par le facteur G/S que les études récentes ont fait apparaître comme moins importante qu'on ne le pensait auparavant, dans la mesure où ce facteur reste inférieur à 2 ;
- La granulométrie du sable caractérisée, par exemple, par son module de finesse. Le module de finesse d'un sable pour béton est généralement compris entre 2,2 et 2,8.

IV.4.4 Choix et dosage des adjuvants :

Selon la propriété recherchée pour le béton, on aura recours à l'adjuvant approprié : accélérateur de prise, plastifiant, entraîneur d'air... Compte tenu de la diversité des produits disponibles, on se conformera aux prescriptions du fabricant pour leur emploi et leur dosage, et on vérifiera leur compatibilité avec le ciment.

IV.5 Différentes méthodes de formulation des bétons :

L'objectif de toutes les méthodes de formulation de bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible, on citera :

- Méthode de Bolomey.
- Méthode de Vallette.
- Méthode d'Abrams.
- Méthode de Faury.
- Méthode de Joisel.
- Les abaques de G. Dreux.

IV.5.1 Méthode à granularité continue de Bolomey :

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique. La formule de base est la suivante :

$$p \% = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \tag{Eq IV.2}$$

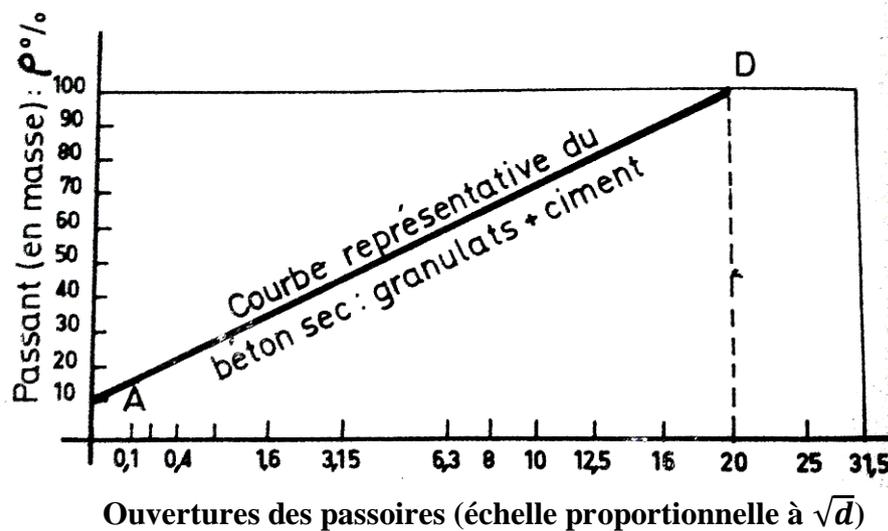


Figure IV.2 : Droite de référence Bolomey

A est un coefficient variant de 8 à 16 d'autant plus élevé que le dosage en liant est important, le tableau IV.2 résume les valeurs de A.

D est le plus gros diamètre des grains.

p est la proportion de constituants des granulats passant au tamis correspondant de maille **d**

Tableau IV.2 : Valeurs de (A) pour la méthode de Bolomey

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton compacté	6 à 8	8 à 10
Béton armé	10	12 à 14
Béton coulé	12	14 à 16

La méthode de Bolomey donne des bétons riches en éléments fins, donc maniables, et susceptibles de rester bruts lors du décoffrage. On l'emploiera lorsque ces qualités sont recherchées, la résistance mécanique doit être bonne. Son emploi est fréquent pour les travaux routiers, et pour les bétons qui doivent être mis en place par pompage.

IV.5.2 Méthode de Vallette à caractère expérimental :

Elle consiste à rechercher un béton plein à minimum de grains fins (sable). La granularité est discontinue.

La loi de granularité continue ne conduit pas en général aux bétons de compacité maximale, c'est pourquoi Vallette a mis au point une méthode essentiellement expérimentale dite « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum de sable » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ». [20]

Le principe de cette méthode peut se résumer comme suit :

- Dans les cas les plus courants, on partira en général de deux granulats (bétons binaires) avec un sable 0/5 mm et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité avec le sable, 16/25 mm par exemple.
- On prépare d'abord avec le sable le mortier plein, à minimum de ciment, ce mortier s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en remplaçant ce volume de vide par un volume égal de pâte pure de ciment.

- On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage plein ressuant avec une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient ainsi le béton plein à minimum de sable et le moins dosé.
- Pour déterminer le béton de dosage demandé, souvent fixé à priori et plus élevé en général que le dosage précédent, on substitue le volume de pâte pure compensatrice correspondante, à un égal volume plein mouillé de sable.
- A titre de vérification, on exécute une petite gâchée de béton avec la composition ainsi déterminée, on vérifie si ces quantités sont bien celles que l'on désirait et, par une mesure de densité de béton frais, on s'assure que le dosage en ciment en kilogrammes par mètre cube est bien celui prescrit.

IV.5.3 Méthode d'Abrams :

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse globale pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer. Le module de finesse du mélange est choisi de manière que les vides dans ce mélange soient, en principe, réduits au minimum. Les modules optimaux pour béton de granulats roulés, déterminés expérimentalement par Abrams, sont indiqués dans le tableau IV.3 en fonction du dosage en ciment et de la dimension D du granulat le plus gros.

Tableau IV.3 : Valeurs optimales d'après Abrams du module de finesse des compositions granulaires des bétons courants. [20]

Dosage en ciment kg/m ³	Dimension maximale D des granulats						
	10	15	20	25	30	40	60
275	4.05	4.45	4.85	5.25	5.60	5.80	6.00
300	4.2	4.60	5.00	5.40	5.65	5.85	6.20
350	4.3	4.70	5.10	5.50	5.73	5.88	6.30
400	4.4	4.80	5.20	5.60	5.80	5.90	6.40

Nous rappelons ici la règle du mélange d'Abrams : elle permet de calculer les pourcentages relatifs de granulats de modules de finesse Mf_1 et Mf_2 pour obtenir un module Mf choisi pour le mélange.

A titre d'exemple, prenons un gravier 5/20 mm de module $Mf_1 = 6.5$ et un sable 0/5mm de module de finesse $Mf_2 = 2.60$, choisissons pour le mélange de sable et gravier un module de finesse $Mf = 5.00$ par exemple (dosage en ciment $300 \text{ Kg} / \text{m}^3$).

$$\text{Soit : } S_1 = Mf_1 - Mf = 6.5 - 5 = 1,5.$$

$$S_2 = Mf - Mf_2 = 5 - 2.6 = 2,4.$$

$$S = S_1 + S_2 = 3,9.$$

$$\text{Proportion du gravier : } \frac{S_2}{S} = \frac{2,4}{3,9} = 62\%$$

$$\text{Proportion de sable : } \frac{S_1}{S} = \frac{1,5}{3,9} = 38\%$$

Tout réside donc, dans cette méthode, sur le choix judicieux du module de finesse du mélange à réaliser (avec les granulats seuls). Ce module dépend évidemment de nombreux paramètres tels que : forme, nature et dimension des granulats, dosage en ciment, résistance et plasticité désirée, etc. [20]

IV.5.4 Méthode de Faury :

En 1942, J.Faury proposa, comme suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation du type « continu ».

Il s'inspirait pour cela d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspond à un serrage moyen. La loi de granulation qui on découle est une loi de fonction de $\sqrt[5]{d}$, c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses graduée en $\sqrt[5]{d}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite, cependant Faury a distingué les grains fins et moyens ($< \frac{D}{2}$) des gros grains ($> \frac{D}{2}$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces catégories.

On trace pour l'ensemble du mélange, ciment compris une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse $\sqrt[5]{d}$. L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée à $\frac{D}{2}$ et son ordonnée Y est donné par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et comportant certains paramètres dont la valeur est à choisir dans des tableaux en fonction de la qualité des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance du serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins intense).

Cette valeur se calcule par la formule suivante :

$$Y = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad (\text{Eq IV.3})$$

Le paramètre **A** se choisit dans le tableau suivant (tableau IV.4) et D est exprimé en dimension passoire.

B varie de 1 à 2 selon que le béton est ferme ou mou.

R est le rayon moyen du moule.

En choisissant des valeurs moyennes pour les paramètres A, B et R, la valeur moyenne de Y est de l'ordre de 60% pour D = 16 mm et de 75% pour D = 100mm.

Pour un béton D = 25mm les valeurs extrêmes de Y sont :

Valeur maximale : consistance très fluide, sans serrage, granulats concassés, effet de paroi important :

$$Y = 38 + 17 \sqrt[5]{25} + \frac{2}{1-0,75} = 78\%. \quad (\text{Eq IV.4})$$

Valeur minimale : serrage exceptionnellement puissant, granulats roulés, effet de paroi négligeable.

$$Y = A + 17 \sqrt[5]{D}$$

$$Y = 22 + 17 \sqrt[5]{25} = 54\%.$$

Tableau IV.4 : Valeur de A (Méthode de Faury) [20]

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

Ces valeurs donnent les deux courbes de références tracées sur la figure IV.3

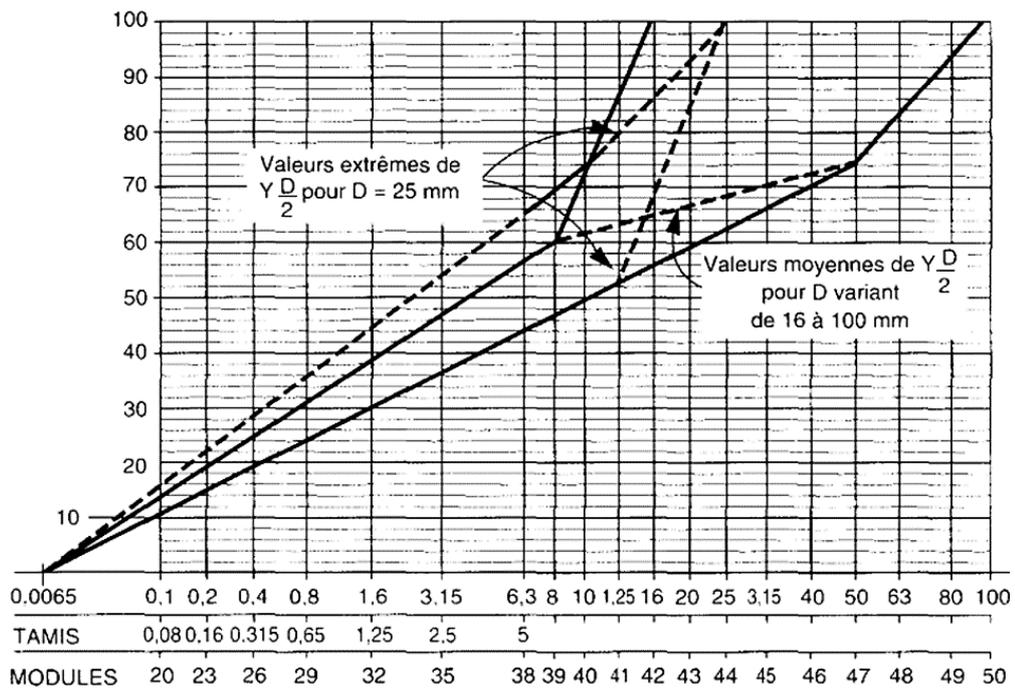


Figure IV.3 : Courbes de référence Faury [20]

IV.5.5 Méthode de Joisel :

S'inspirant comme Faury de la théorie de Caquot, mais en la généralisant, A.Joisel propose de considérer que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de $\sqrt[m]{d}$, m dépend de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimension uniforme selon les moyens de serrage, m peut alors varier de 3 à 10 .

Afin d'obtenir une courbe granulométrique de référence qui se réduit à une simple droite, l'échelle des abscisses n'est plus symétriquement proportionnelle à $\sqrt[5]{d}$ (Faury) mais à $\sqrt[m]{d}$, m variant avec le serrage des matériaux.

Comme dans la méthode de Faury, on aboutit donc en principe à une granularité continue sauf, bien entendu, si les granulats dont on dispose en pratique présente une discontinuité.

Toutefois, pour éviter la cassure de la droite de référence au point d'abscisse $\frac{D}{2}$, Joisel a déterminé l'échelle de l'intervalle $\frac{D/2}{D}$ de façon à n'avoir qu'une simple et unique droite, c'est l'avantage de cette méthode mais, en revanche, il faut employer un graphique dont l'échelle des abscisses est variable d'une étude à l'autre, d'un type de granulat à un autre. C'est ensuite par une méthode graphique dont nous nous inspirons que se déterminent les pourcentages des divers granulats.

Comme pour les méthodes Faury et Vallette le dosage en ciment déterminé par cette méthode est le dosage minimal correspondant théoriquement sur le plan granulométrique, à la compacité maximale, ce dosage est en général nettement inférieur (150 à 200 Kg/m³) au dosage nécessaire ou exigé (250 à 400 Kg/m³ dans la plupart des cas).

IV.5.6 Une méthode pratique de composition : les abaques de G. Dreux

La méthode des abaques de Dreux permettra de déterminer la composition du béton en dosage en ciment, sable et gravier ainsi que la quantité d'eau de gâchage.

La résistance et l'ouvrabilité désirées conduisent à déterminer le dosage en ciment, sable, gravier et en eau.

Exemple : abaque N°1 - béton normale D = 25mm.

A- Marche à suivre (figure IV.4) :

A partir de la plasticité désirée 1, on suit une verticale jusqu'à rencontrer au point R la droite représentative de la résistance escomptée σ' .

Du point R, tracer l'horizontale vers la droite qui rencontre :

- L'échelle verticale du dosage en ciment C ;
- L'oblique pour le sable 0/5 en G₁ ;
- L'oblique pour le gravier 5/25 en G₂.

De G₁ et de G₂, descendre des verticales qui rencontrent des volumes en litres (ou dm³).

L'indication du dosage en eau est donnée en E suivant la teneur en eau des granulats.

B- Lecture d'abaque :

▪ **Données :**

Résistance escomptée 350 bars ou 35 MPa.

Plasticité désirée correspondante à un affaissement de 11 cm au cône d'Abrams (béton mou).

Sable 0/5 et gravier 5/25.

▪ **Lecture :**

Il suffit de suivre le circuit des flèches pour trouver :

- 438 dm³ de sable 0/5.
- 792 dm³ de gravier 5/25.
- 400 Kg de ciment par m³ de béton en utilisant un adjuvant (plastifiant).

Le rapport gravier / sable est de :

$$\frac{792}{438} = 1.8$$

Abaque N°1 – Béton normal D = 25mm

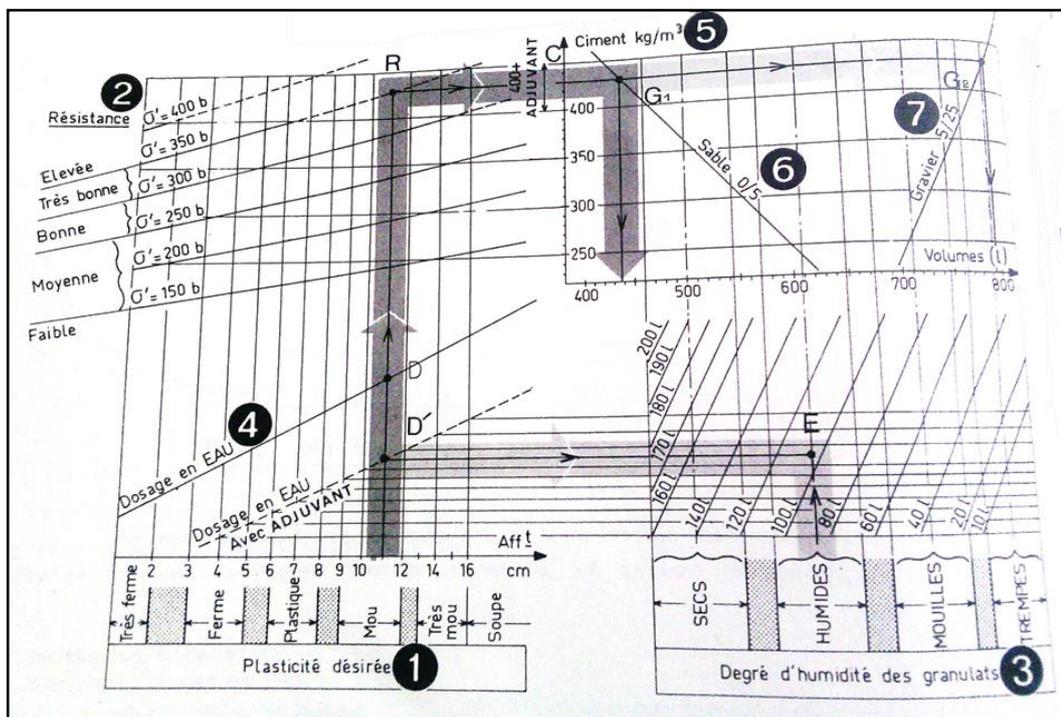


Figure IV.4 : Utilisation d'abaque (méthode Dreux) [21]

La diversité de ces méthodes et les nombreux paramètres à choisir en fonction de divers autres différemment appréciés a fatalement pour conséquence de faire varier les compositions utilisées dans la confection des bétons.

IV.6 Formulation des bétons à hautes performances :

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. En effet, les dimensions et les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité. L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire. La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes :

A- Détermination d'une formule théorique prévisionnelle :

- Sélection des constituants en fonction de l'expérience locale ;
- Détermination des proportions des constituants ;
- Optimisation du squelette granulaire.

B- Optimisation du mélange en laboratoire :

- Validation de la compatibilité ciment /adjuvant ;
- Ajustement de la quantité de la pâte et de l'adjuvant;
- Vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- Analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants;
- Analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en œuvre (température).

C- Validation de la formule sur chantier :

- Vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- Vérification des éventuelles spécifications complémentaires telle que la pompabilité ;
- Vérification des caractéristiques du béton.

IV.6.1 Méthode de formulation de BHP :

Les méthodes de formulation des BHP relèvent encore plus d'un art que d'une science, il est certain qu'elles reposent aussi sur des principes scientifiques qui sont à la base de toutes les formulations de béton.

Il est intéressant de noter un regain d'intérêt pour les méthodes de formulation des bétons (Day, 1996 ; Ganju, 1996 ; de Larrard et Sedran, 1996 ; Popovics, 1996). En fait, cet intérêt ne fait que traduire les limitations des méthodes actuelles qui ont été surtout développées pour formuler des bétons usuels et qui ont été utilisées sans créer trop de problèmes pendant de nombreuses années. Tant et aussi longtemps que le béton usuel restera essentiellement un mélange de ciment portland, d'eau, de granulat et quelquefois d'air entrainé. Ces méthodes serviront seulement de guide ayant une valeur prédictive plus ou moins valable pour formuler un béton ayant un affaissement et une résistance à la compression donnée. Ces méthodes de formulation ont perdu beaucoup de leur valeur parce que :

- La plage des rapports E/C ou des rapports E/L des bétons modernes est beaucoup plus étendue que celle des bétons d'il y a quelques années surtout dans la gamme des faibles valeurs grâce à l'utilisation des super-plastifiants.
- Les bétons modernes contiennent souvent un ou plusieurs ajouts cimentaires qui remplacent une plus ou moins grande quantité de ciment.
- L'affaissement peut être ajusté en utilisant un super plastifiant plutôt que de l'eau sans altérer le rapport E/C.

Des outils spécifiques de contrôle ont été développés pour faciliter la formulation des BHP : méthode des coulis AFREM, méthode MBE (Mortier de Béton Équivalent), La méthode de L'Université de Sherbrooke, Rhéomètre, logiciel BETONLAB.

IV.7 Conclusion :

La diversité des bétons actuels (Béton AutoPlaçant BAP, Béton Haute Performance BHP, Béton Ultra Haute Performance BUHP, bétons fibrés...), aux propriétés extrêmement variables, ne permet pas d'imaginer un principe de formulation unique. Généralement, la base de la formulation est orientée par les propriétés principales demandées au matériau et adaptée en fonction des propriétés secondaires recherchées. Il faut donc raisonner par catégorie de béton même si certains principes communs peuvent être retenus.

Les différentes méthodes trouvent leurs intérêts dans un traitement des données en amont en laboratoire (caractéristiques des constituants) par rapport à des essais de calage faits sur site. Bien sûr, tous les résultats obtenus théoriquement doivent être confirmés par des gâchées réelles pour vérifier l'exactitude des méthodes utilisées. Après la phase de validation, la formule ainsi obtenue peut-être adaptée au site de production avec les jeux de constituants étudiés en laboratoire. De plus, le béton et ses constituants doivent malgré tout répondre à des critères normatifs et aux certifications, gage de qualité des produits finis.

La méthode de formulation utilisée dans notre étude est celle de Faury.

Chapitre

V

Matériaux, matériels et
essais

Chapitre V

Matériaux, matériels et essais

V.1 Introduction :

Comme nous l'avons déjà mentionné dans le chapitre précédent sur la formulation des BHP, la recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. La limitation de la porosité implique essentiellement deux conditions :

- Une très faible teneur en eau ;
- Une granulométrie comportant des éléments fins en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.

L'emploi des superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange (entraînant la suppression d'un volume important d'eau non mobilisé par l'hydratation du ciment). Les rapports E/C utilisés sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel. Les superplastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme.

Ce chapitre a pour objet de présenter l'ensemble du contexte expérimental. Nous commencerons par une description des matériaux qui ont été utilisés durant cette étude, nous présenterons ensuite les différents essais d'identification des matériaux utilisés, ainsi que les essais réalisés sur le béton frais, nous décrirons enfin la préparation des éprouvettes en parlant sur les essais mécaniques de compression et de traction réalisés sur le béton durci.

V.2 Matériaux utilisés :

Il est bien connu que le béton est un matériau composite, ses propriétés à l'état frais et à l'état durci, comme la résistance à la compression et la durabilité, dépendent de la nature, la qualité et le dosage de ses composants, c'est pour cela qu'il est nécessaire de bien les caractériser.

Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale sont des matériaux locaux et naturels. Tous les bétons sont réalisés avec les mêmes matériaux qui sont :

V.2.1 Ciment :

Le ciment que nous avons utilisé pour ce programme expérimental est un ciment portland au calcaire CEM II/B-L de classe 42.5 N, provenant de la cimenterie Lafarge. Les différentes caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du ciment utilisé sont établies sur la fiche technique élaborée au niveau d'un laboratoire spécialisé conformément aux normes NA 442 et EN 197-1 et à la norme NF P 15-301194.

Voir les fiches techniques jointes en annexe I pour plus de détails sur ce ciment.



Figure V.1 : Ciment utilisé CEMII/B-L 42.5N

V.2.2 Granulats :

Les granulats utilisés sont de trois classes granulaires : un sable roulé 0/4 du Guelta (la région de Laghouat), et deux graviers concassés de nature calcaire (3/8) et (8/15), provenant de la carrière K'bouba au nord de Tiaret.



Sable roulé

Gravier 3/8

Gravier 8/15

V.2.3 Addition minérale :

Nous avons introduit des fillers calcaires 0/0.125, provenant de la carrière d'Entreprise Nationale des Granulats E.N.G, unité SIDI ABDELLI, Tlemcen. Ces fillers sont caractérisés par une teneur en CaCO_3 supérieure à 89%, et une masse volumique absolue de 2625 Kg/m^3 .

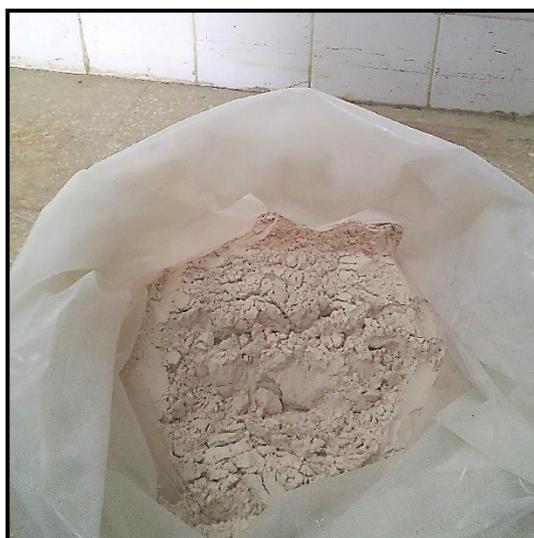


Figure V.2 : Fillers calcaires 0/0.125

V.2.4 L'eau de gâchage :

L'eau utilisée dans cette étude est celle du robinet.

V.2.5 Adjuvants :

Nous avons utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau « GLENIUM[®] 26 ». Le GLENIUM[®] 26 est un adjuvant liquide recommandé pour la fabrication de bétons à faible E/C, hautes performances et à très long maintien d'ouvrabilité.



Figure V.3 : Superplastifiant « GLENIUM[®] 26 »

Tableau V.1 : Quelques caractéristiques de GLENIUM[®] 26

Caractéristiques	Aspect	Couleur	pH	Masse volumique	Teneur en chlorures	Le dosage recommandé
Résultats	Liquide	Brun	7,0 ± 1	1,08 ± 0,02 g/cm ³	< 0,1 %	0,3 à 2,0 % du poids du ciment

Voir la fiche technique en annexe II pour plus d'indications sur ce produit.

V.3 Caractérisation des matériaux :

Avant d'entamer une formulation, il convient de bien connaître les caractéristiques des matériaux utilisés à cet effet par le biais d'essais normalisés au laboratoire.

V.3.1 Caractéristiques applicables aux graviers (3/8 et 8/15) :

La qualité du gravier peut être appréciée à travers divers essais de laboratoire, on citera :

- Analyse granulométrique par tamisage.
- Propreté superficielle.
- Coefficient d'Aplatissement.
- Masse volumique apparente et absolue.
- Essai Los-Angeles.
- Détermination de la teneur en carbonate (méthode de calcimètre).

V.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage (NF P18-560) :

- **Définition :**

Quantitativement, les granulats constituent le principal composant du béton. Il n'est donc pas étonnant que leurs propriétés exercent une grande influence sur le béton. La répartition granulométrique – déterminée par l'analyse granulométrique - ainsi que la forme, la surface et le diamètre maximal des grains, ont une importance primordiale.

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, ...), elle consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 125 mm.

- **Matériaux 0/D :**

D = dimensions maximum des grains.

0 = grains de dimension inférieure à 0,080 mm ou 80 microns.

Ex : 0/20, 0/31.5, 0/6,3 etc ...

- **Matériaux d/D :**

D = dimension maximum des grains.

d = dimension minimum des grains.

Ex : 2/4, 6,3/10, 10/20, 20/40 etc ...

- **Granularité** : distribution dimensionnelle des grains.
- **Refus sur un tamis** : matériau qui est retenu sur le tamis.
- **Tamisât (ou passant)** : matériau qui passe à travers le tamis.

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).

▪ **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon.

On utilise des tamis à ouverture définie (ouverture des trous ou des mailles). En commençant par le tamis supérieur, c'est-à-dire le tamis à la plus grande ouverture, on détermine pour chaque tamis le refus en gramme, et partant de là, en pour cent de la masse totale. En soustrayant le refus sur le tamis à ouverture immédiatement supérieure, on obtient le tamisât du tamis concerné, en g ou en % de la masse. Les illustrations qui en sont donnée dans les tableaux V.3, V.4 et V.15 se rapportent à des analyses granulométriques pour les granulats que nous avons utilisés (0/4, 3/8 et 8/15). Ces résultats constituent la base pour représenter la granulométrie du mélange de ces granulats sous forme de courbes granulométriques.

▪ **Matériels utilisés :**

- Une colonne de tamis propres correspondants à chaque fraction.
- Une balance.

Tableau V.2 : Tamis utilisés pour le tamisage des granulats.

Fraction	Tamis utilisés (exprimé en mm)
3/8	(8 – 6.3 – 5 – 4 – 2 – 1 et le fond)
8/15	(16 – 12.5 – 10 – 8 – 6.3 – 5 et le fond)



Figure V.4 : Les tamis utilisés

▪ **Préparation de l'échantillon :**

Les échantillons de gravier sont préparés selon la norme NA 2607. La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure ou égale à $0,2 D$ ($M \geq 0.2D$), avec M exprimé en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

Donc on a pris : $M_{8/15} = 3 \text{ Kg}$, $M_{3/8} = 1.6 \text{ Kg}$, pour le sable on a pris une quantité de 500gr.

▪ **Mode opératoire :**

Les matériaux de masse $M_{3/8}$, $M_{8/15}$ sont versés sur des séries de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas vers le haut.

En partie inférieure de chaque série on a disposé un fond d'étanche afin de récupérer les éléments fins. Des couvercles sont également disposés en haut des colonnes afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage.

L'opération du tamisage se fait généralement au moyen d'une tamiseuse électrique où on place la série des tamis. Dans notre cas le tamisage est fait manuellement, on a secoué les colonnes des tamis par des brusques secousses horizontales pendant quelques minutes.

En reprenant un à un les tamis, on a commencé par le 1^{er} qui a la plus grande ouverture, on l'a agité en donnant à la main des coups réguliers sur la monture, en arrêtant jusqu'à le refus sur le tamis ne se modifie pas de plus de 1 % en une minute de tamisage.

On a pesé le refus en gramme puis, on a versé le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur.

La même opération est faite avec tous les tamis de la colonne, les résultats obtenus sont classés dans les tableaux V.2, V.3.



Figure V.5 : Essai d'analyse granulométrique.

Tableau V.3 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/15)

Ouvert. Tamis (mm)	Masse des refus cumulés Ri (gr)	% refus cumulés $Ri/M_{8/15} * 100$	% tamisât cumulés $100 - (100 * Ri/M_{8/15})$
16	16	00	100
12.5	764	25.64	75
10	1779.8	60	40
8	2619.8	87	13
6.3	2971.8	99	1
5	2984.8	99.5	0

Tableau V.4 : L'analyse granulométrique de gravier 3/8

Ouvert. Tamis (mm)	Masse des refus cumulés Ri (gr)	% refus cumulés $(Ri/M_{3/8}) * 100$	% tamisât cumulés $100 - (100 * Ri/M_{3/8})$
8	5	00	100
6.3	151.6	9.5	90
5	396.7	24.8	75
4	771.5	48	52
2	1560.8	97.5	2
1	1593.7	99.6	0

Ces résultats constituent la base pour représenter la granulométrie du mélange de ces granulats sous forme de courbes granulométriques.

La courbe granulométrique est tracée sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisât sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

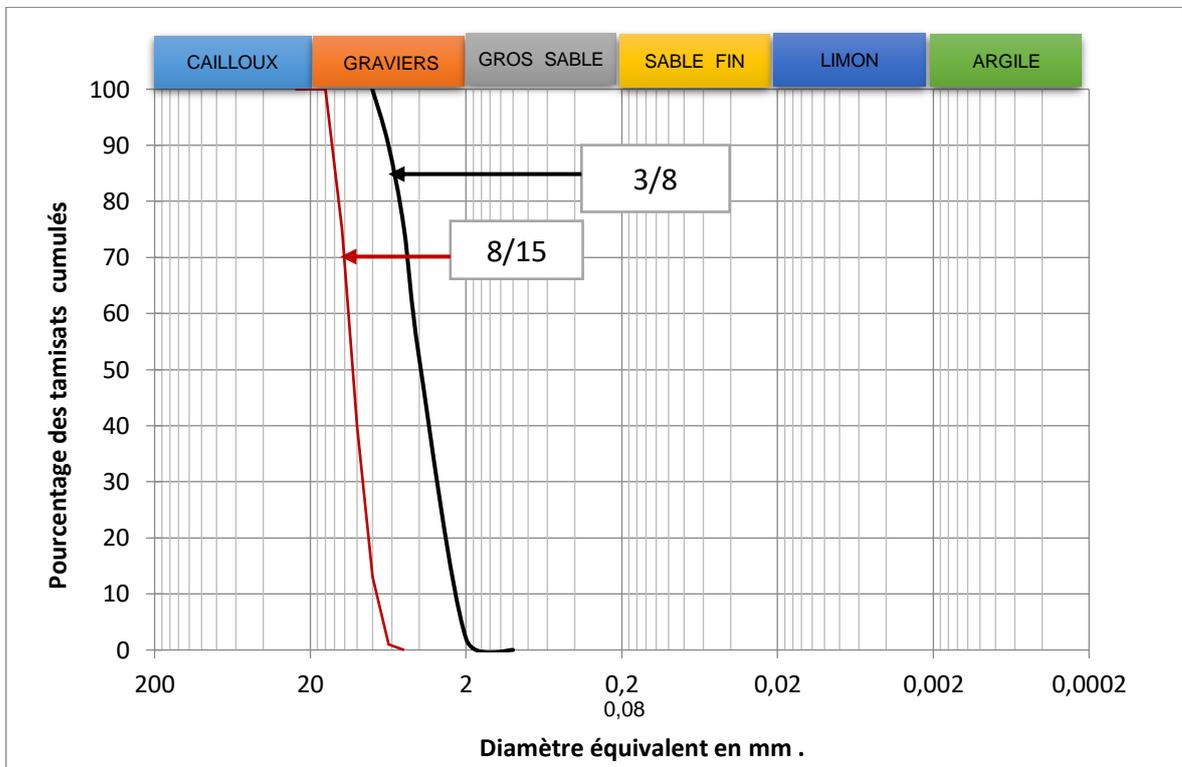


Figure V.6 : La courbe granulométrique sous forme d'interprétation graphique des analyses granulométriques présentées en résumé dans les tableaux 3, 4

V.3.1.2 Propreté superficielle : [NF P 18-591]

▪ Définition :

Tous les granulats contiennent plus ou moins d'impuretés ayant un effet néfaste sur les qualités principales du béton : résistance, imperméabilité, durabilité.

Certaines impuretés sont prohibées : elles perturbent les résultats au-delà des limites permises, même à l'état de traces. Ce sont essentiellement :

- Les particules de charbon, de bois ou leurs résidus,
- Les particules adhérentes d'argile qui isolent le granulat du liant.

L'influence des éléments fins dans un béton est importante :

- Il faut plus d'eau pour mouiller des éléments fins que pour les gros granulats. La résistance d'un béton varie dans le même sens que le rapport C/E. Un sable contenant beaucoup d'éléments fins conduira à une faible valeur de C/E et donc à une moindre résistance du béton,
- L'eau de gâchage ainsi mise en plus s'évaporerait au cours du durcissement : retrait plus important et risques de fissures,
- Les éléments fins et l'eau forment une boue qui gêne l'adhérence du liant.

▪ Principe de l'essai :

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules inférieures à 0,5 mm mélangées ou adhérentes à la surface des granulats dont $D > 2$ mm. Ces particules sont séparées par lavage sur le tamis correspondant.

▪ Appareillage :

- Un tamis de 0.5 mm.
- Balance.
- Etuve réglée à 105°C.

▪ Préparation de l'échantillon :

La masse M de l'échantillon doit être telle que : $M \geq 0,2D$. (avec M en kg et D en mm).

▪ **Mode opératoire :**

Nous avons suivi les instructions suivantes :

- Peser l'échantillon soit M et le placer dans le tamis.
- Tamiser à l'eau (laver l'échantillon jusqu'à ce que l'eau qui traverse le tamis soit claire).
- Récupérer le refus et le sécher à l'étuve.
- Peser l'échantillon sec soit Ms.

La propreté superficielle est donnée par :

$$P\% = \left[\frac{M - M_s}{M} \right] \times 100 \quad (\text{Eq V.1})$$

Avec :

P% : La propreté superficielle en pourcentage.

M : Masse de l'échantillon (prise d'essai).

Ms : Masse de l'échantillon sec.

La norme XP P 18-540 Granulats - Définitions, conformité, spécifications fixe les seuils de la propreté superficielle des gravillons pour bétons hydrauliques, aux valeurs du passant à 0,5 mm suivantes : 1,5 % pour les gravillons peu ou pas concassés, 3 % pour les gravillons de roches massives concassées.

Les résultats sont représentés dans le tableau V.5



Figure V.7 : Essai pour la détermination des propriétés superficielles

Tableau V.5 : Résultats de propreté superficielle

Gravier	M (gr)	Ms (gr)	La propreté = [(M – Ms) / M]x100
3/8	1600	1585	0.93%
8/15	3000	2992	0.26%

V.3.1.3 Mesure du coefficient d'aplatissement : (NA 256/1990) équivalent de [P18 -561]**▪ Définition :**

La forme du gravier est déterminée par l'essai d'aplatissement (A). Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Plus C.A est élevé, plus le gravier contient d'éléments plats. Une mauvaise forme (aiguilles, plats) a une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation.

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques :

- La longueur L,
- L'épaisseur E,
- La grosseur G, dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat.

Le coefficient d'aplatissement C.A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation : $\frac{G}{E} > 1.58$

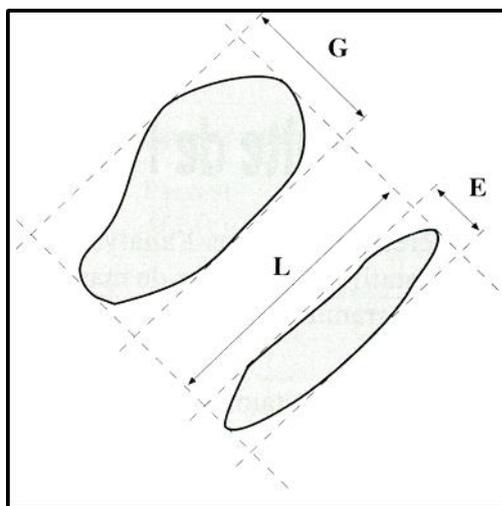


Figure V.8 : Forme d'un granulat.

L'ancienne norme P18 -541 spécifiait que la valeur du coefficient d'aplatissement doit être : $A \leq 30\%$.

La nouvelle norme P18 -561 a remplacé le terme valeur maximale en % par « Vss » signifiant « Valeurs spécifiées supérieurs », et indique les pourcentages ci-après en fonction de la catégorie des granulats :

Tableau V.6 : Coefficient d'aplatissement (A, P18-561) [XP P18-540]

Catégorie	Vss
A	20
B	30
C	30
D	40

▪ **Principe de l'essai :**

Il s'agit de déterminer le coefficient d'aplatissement d'un échantillon de granulats dont les dimensions sont comprises entre 4 et 50 mm (dans notre étude cet essai est effectué sur les gravier de classe 8/15).

L'essai consiste à effectuer un double tamisage :

- Tamisage sur tamis à mailles carrées, pour classer l'échantillon étudié en différentes classes d/D (avec $D = 1,25 d$), suivant leur grosseur G.
- Puis tamisage des différentes classes granulaires d/D, sur des grilles à fentes parallèles d'écartement d/1,58.

▪ **Appareillage :**

- Pour le premier tamisage, on a utilisé les tamis à maille carrée d'ouverture :
16 – 12.5 – 10 – 8 – 6.3 – 5 mm.
- Pour la détermination du coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire, on a utilisé une série de grilles dont les espacements intérieurs des barres sont respectivement de :
10 – 8 – 6.3 – 5 – 4 – 3.15 – 2.5 mm.
- Balance.

▪ **Préparation de l'échantillon :**

On a pris un échantillon de masse $M \geq 0.2D$.

▪ **Mode opératoire :**

Nous avons suivi les instructions suivantes :

- Préparer échantillon pour analyse granulométrique.
- Prendre une masse $200D < M < 600D$.
- Tamiser l'échantillon sur le tamis 4mm.
- Peser le refus soit M_0 en gr.
- Tamiser l'échantillon sur tamis à maille carrée.
- Peser la fraction d/D, soit M_g .
- Tamiser la fraction d/D sur la grille dont l'écartement E entre les barres est défini par un tableau de correspondance (voir tableau V.6).
- Peser la masse des éléments passant sur la grille à fente, soit M_e .

Par fraction de matériau, le coefficient d'aplatissement A est égal à : $\left[\frac{M_e}{M_g} \right] \times 100$

Le coefficient d'aplatissement globale est calculé en faisant la somme des masses de fraction granulaire et la somme des passant, avec la même formule que ci-dessus.

$$C.A = \sum \left(\frac{M_e}{M_g} \right) \times 100 \quad (\text{Eq V.2})$$

Avec :

C.A : coefficient d'aplatissement C.A

M_g : masse de la classe granulaire d/D.

M_e : masse passant à travers le tamis à fentes d'écartement correspondant.

Les résultats sont indiqués dans le tableau V.7.



Figure V.9 : Détermination du coefficient d'aplatissement C.A

Tableau V.7 : Coefficient d'aplatissement du gravier 8/15

Classe granulaire (d/D) mm	16 - 20	12.5 – 16	10 – 12.5	8 - 10	6.3 - 8	5 – 6.3	4 - 5
Ecartement	10	8	6.3	5	4	3.15	2.5
(Mg) en gr	16	748	1015.8	840	352	13	2984.8
(Me) en gr	0	87.15	122.5	88	32.8	3	333.45
Coefficient d'aplatissement = $\sum(Me/Mg) \times 100$						11.17%	

V.3.1.4 La masse volumique du gravier (3/8, 8/15) :

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume, on distinguera :

A- La masse volumique apparente :

C'est le rapport entre la masse d'un corps est l'unité de volume apparent (y' compris les vides), Elle est exprimée en (g/cm^3 , Kg/m^3 , t/m^3).

▪ Principe de l'essai :

Le principe de cette mesure consiste à remplir un récipient avec un volume connu et de peser la quantité de granulats correspondant.

On remplit un récipient dont on connaît le volume, en prenant de grandes précautions pour éviter les phénomènes parasites provoqués par le tassement. On pèse ensuite l'échantillon en prenant soin de déduire la masse du récipient. La masse de l'échantillon est divisée par le volume du récipient pour donner la masse volumique apparente du matériau.

▪ Matériels utilisés :

- Une balance.
- Un récipient de 2L.
- Une règle métallique à araser.

▪ Mode opératoire :

Nous avons suivi les instructions suivantes pour les trois matériaux :

- Peser le récipient vide et taré, (soit M_1 en gr le poids du récipient vide).
- Prendre le matériau dans les deux mains formant un entonnoir.
- Placer les deux mains à hauteur d'environ 10 cm au-dessous de récipient.
- Verser le matériau au centre de récipient jusque qu'il soit rempli et débord au tour.
- Araser avec la règle sans compacter le matériau.
- Peser le récipient plein soit M_2 (gr) sa masse.

La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$M_{vapp} = \frac{(M_2 - M_1)}{V} \quad (\text{Eq V.3})$$

Avec :

M_1 : poids de récipient vide.

M_2 : poids de récipient plein.

V : volume du récipient.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau V.8.



Figure V.10 : Essai de détermination de la masse volumique apparente du gravier 3/8



Figure V.11 : Essai de détermination de la masse volumique apparente du gravier 8/15

Tableau V.8 : La masse volumique apparente des granulats (3/8, 8/15).

Granulats	M ₁ (gr)	M ₂ (gr)	M ₂ – M ₁	V récipient (1L=1000cm ³)	M _{VApp} (gr/cm ³)
3/8	1840	4755	2915	2000	1.45
8/15	1840	4690	2850	2000	1.42

B- La masse volumique absolue du gravier (3/8, 8/15) : [NA 255/1990]

C'est le rapport entre la masse et l'unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Elle est exprimée en (g/cm³, Kg/m³, t/m³).

- **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à mesurer le volume réel occupé par les granulats, sans tenir compte des vides. Dans notre étude on a utilisé la méthode de pesée hydrostatique.

- **Matériels utilisés :**

- Balance hydrostatique ou balance de précision aménagée.
- Récipient.

- **Mode opératoire (méthode de pesée hydrostatique) :**

Nous avons suivi les instructions suivantes :

- Préparer l'échantillon.
- Prendre une masse de 500gr, soit M₁.
- Immerger l'échantillon dans l'eau.
- Peser l'échantillon dans l'eau : pesé hydrostatique (soit M₂).
- Noter la masse dans l'eau soit M₂

La masse volumique absolue est déterminée par la formule suivante :

$$M_{V \text{ absolue}} = \frac{M_1}{M_1 - M_2} \quad (\text{Eq V.4})$$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau V.9



Figure V.12 : Détermination de la masse volumique absolue du gravier (3/8 et 8/15)

Tableau V.9 : Masse volumique absolue du gravier (3/8 et 8/15)

Gravier	M_1 (gr)	M_2 (gr)	$M_1 - M_2$	MV_{absolue} (gr / cm ³)
3/8	500.1	313.7	186.4	2.683
8/15	500	313.6	186.4	2.682

Les 2 graviers ont donné des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620. La masse volumique apparente est comprise entre 1300 kg/m³ et 1600 kg/m³ et la masse volumique absolue est nettement plus élevée et est comprise entre 2500 kg/m³ et 2700 kg/m³.

V.3.1.5 Essai « Los-Angeles » NA 458 -Résistance à la fragmentation des graviers

- **Définition :**

L'essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées aux chocs et à la détérioration progressive par frottement réciproques des éléments d'un granulat. Il se pratique sur les classes granulaires 4/6, 6/10, 10/14, 10/25, 16/31, 25/50 (gravillons pour chaussée et bétons hydrauliques).

La machine utilisée comporte un cylindre creux pouvant tourner de son axe et où on introduit l'échantillon ainsi que des boulets d'acier jouant le rôle de charges abrasives.



Figure V.13 : Appareil de Los Angeles

Au cours de l'essai, le tambour effectue 500 tours à une vitesse de rotation comprise entre 31 et 33 tours/min.

- **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à introduire dans un cylindre en rotation pendant une durée déterminée des boulets d'acier et une prise de gravillons appartenant à une classe granulaire de masse normalisée, de mesurer l'importance de la fragmentation et l'usure occasionnée pendant l'essai. La résistance du matériau est d'autant plus grande que la valeur de son coefficient L.A sera faible.

Tableau V.10 : La dureté des agrégats en fonction du coefficient L.A [22]

Valeurs repérés	
Coefficient Los-Angles	Appréciation
< 15	Très bon à bon
15 à 25	Bon à moyen
25 à 40	Moyen à faible
> 40	Médiocre

▪ **Matériels utilisés :**

- Balance.
- Tamis de 4 – 6.3 – 10 et 14mm.
- Etuve réglée à 105°C.
- Charge de boulets : la charge est constituée par des boulets sphériques de 47mm ± 1mm de diamètre et pesant entre 420 et 445g, en acier.
- Des bacs destinés à recueillir les matériaux après essai.

▪ **Mode opératoire :**

Nous avons suivi les instructions suivantes :

- Prélever un échantillon de 15000gr.
- Définir la classe granulaire choisie. (On a choisi (4 – 6.3) pour gravier 3/8 et la classe (10 – 14) pour gravier 8/15)
- Tamiser à sec selon la classe granulaire choisie
- Laver l'échantillon tamisé et le sécher à 105°C.
- Peser 5000gr.
- Introduire avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie, la charge est fixée conformément aux indications du tableau V.9 (dans notre cas on a pris 07 boulets pour gravier 3/8 et 11 boulets pour gravier 8/15)
- Mettre la machine en marche.
- Recueillir le matériau.
- Tamiser le matériau sur un tamis de 1.6mm.
- Laver le refus au tamis de 1.6mm. Egoutter et sécher à l'étuve à 105°C.
- Peser ce refus une fois séché. Soit M' le résultat de la pesée.

Tableau V.11 : Classe granulaires et nombre de boulets d'acier pour l'essai Los Angeles

Classes granulaires mm	Nombre de boulets	Masse totale de la charge en gr
4 – 6.3	7	3080
6.3 – 10	9	3960
10 – 14	11	4840
10 – 25	11	4840
16 – 31.5	12	5280
25 – 50	12	5280

▪ **Expression des résultats :**

Le coefficient Los-Angles L.A est un pourcentage en masse du rapport des éléments passant au tamis de 1,6 mm séchés après lavage (M') et la masse sèche initiale des granulats intacts.

$$\text{Donc c'est : } \frac{(5000 - M')}{5000} \quad (\text{Eq V.5})$$

Les résultats sont représentés dans le tableau V.12.



Figure V.14 : Préparation des échantillons pour l'essai Los Angeles



Figure V.15 : Essai Los Angeles



Figure V.16 : Echantillon après l'essai L.A

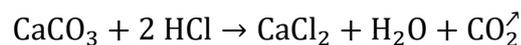
Tableau V.12 : Détermination du coefficient L.A

Fraction de gravier	Masse initiale en gr	M _f en gr	L.A en %
3/8	5000	3902.7	22%
8/15	5000	3755.1	25%

V.3.1.6 Détermination du taux des carbonates dans les graviers (3/8, 8/15) [NA-2789] (Méthode calcimètre de Bernard)

- **Définition :**

Le principal carbonate est le carbonate de calcium (CaCO₃) constituant plus de 50% des roches calcaires. Il fait effervescence avec l'acide chlorhydrique (HCl).



Un calcimètre permet de mesurer le volume de CO₂ dégagé par action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur le carbonate de calcium (CaCO₃) d'un échantillon de sol ou de roche.

- **Principe :**

L'essai consiste à mesurer le volume de CO₂ dégagé, et déduire le pourcentage de calcaire dans l'échantillon.

▪ Matériel :

- Une balance pour peser l'échantillon.
- Un broyeur manuel.
- Une fiole Erlenmeyer de 250ml.
- Un Petit tube.
- Calcimètre Bernard rempli d'eau.
- Pipette jaugée, coudée à son extrémité.
- HCl assez concentré.

▪ Mode opératoire :

Nous avons suivi les instructions suivantes (pour les 2 graviers 3/8 et 8/15) :

- Prélever une masse m de l'échantillon, $m \leq 50g$.
- Broyer l'échantillon.
- Passer tout l'échantillon par des ouvertures du tamis 0.2mm.
- Peser une masse de 0.5g du tamisât.
- Verser les 0.5g dans la fiole.
- Introduire le tube contenant un volume V d'acide chlorhydrique ($V=10ml$).
- Relier la fiole au calcimètre.
- Incliner la fiole afin de faire couler l'acide sur l'échantillon.
- Agiter énergiquement la fiole.
- Reposer la fiole et attendre la fin de l'effervescence.
- Suivre et équilibrer en permanence le niveau d'eau de la colonne et celui de l'ampoule jusqu'à la stabilisation de dégagement gazeux.
- Prélever le volume V (volume de CO_2 dégagé, niveau final - niveau initial).

D'après le tableau V.13 on a pu déterminer la teneur en calcaire du gravier 3/8 et 8/15.



Figure V.17 : Essai pour la détermination des carbonates dans les graviers (3/8 et 8/15)
(méthode calcimètre)

Tableau V.13 : Tableau des valeurs –Essai des carbonates (CaCO₃) [NA 2789]

(Source : laboratoire des travaux public ouest LTPO de Tiaret)

Volume (CO₂ dégagé)	Pourcentage en CaCO₃
2	2
5	4
10	9
11	10
12	11
13	12
15	13
17	15
20	18
25	22
30	27
35	31
40	36
45	40
50	45
55	49
60	54
65	58
70	63
75	67
80	71
85	76
90	80
95	85
100	89
105	94
110	98

Nous avons trouvé un volume de 95 cm^3 , et d'après le tableau V.13 on a déduit le pourcentage de calcaire dans les deux graviers qui est 85%.

V.3.2 Caractéristiques applicables aux sables :

Le sable employé dans la confection du béton, doit aussi répondre à certains critères de qualités. Les qualités recherchées font donc l'objet de différents essais, on citera :

- Analyse granulométrique par tamisage.
- Module de finesse.
- Propreté du sable (équivalent de sable E.S).
- Masse volumique apparente et absolue.
- Essai au bleu de méthylène (méthode à la tache).

V.3.2.1 Analyse granulométrique par tamisage :

- **Appareillage :**
 - Bacs.
 - Balance.
 - Une série du tamis.

Tableau V.14 : Tamis utilisés pour le tamisage du sable.

Fraction	Tamis utilisés (exprimé en mm)
0/4	(4 – 2 – 1 – 0.5 – 0.4 – 0.315 – 0.2 – 0.1 – 0.08 et le fond)



Figure V.18 : Colonne des tamis utilisés

▪ **Mode opératoire :**

Le mode opératoire est le même que celui utilisé pour le gravier. Les résultats de l'analyse granulométrique de sable sont représentés dans le tableau V.15



Figure V.19 : Essai d'analyse granulométrique (sable)

Tableau V.15 : Analyse granulométrique du sable

Ouvert. Tamis (mm)	Masse des refus cumulés Ri (gr)	% refus cumulés $Ri/M_{8/15} \cdot 100$	% tamisât cumulés $100 - (100 \cdot Ri/M_{8/15})$
4	01	00	100
2	04	01	99
1	07	01	99
0.5	36.2	07	93
0.4	90.1	18	82
0.315	183.3	37	63
0.2	387	77	23
0.1	467.4	95	05
0.08	495	99	01

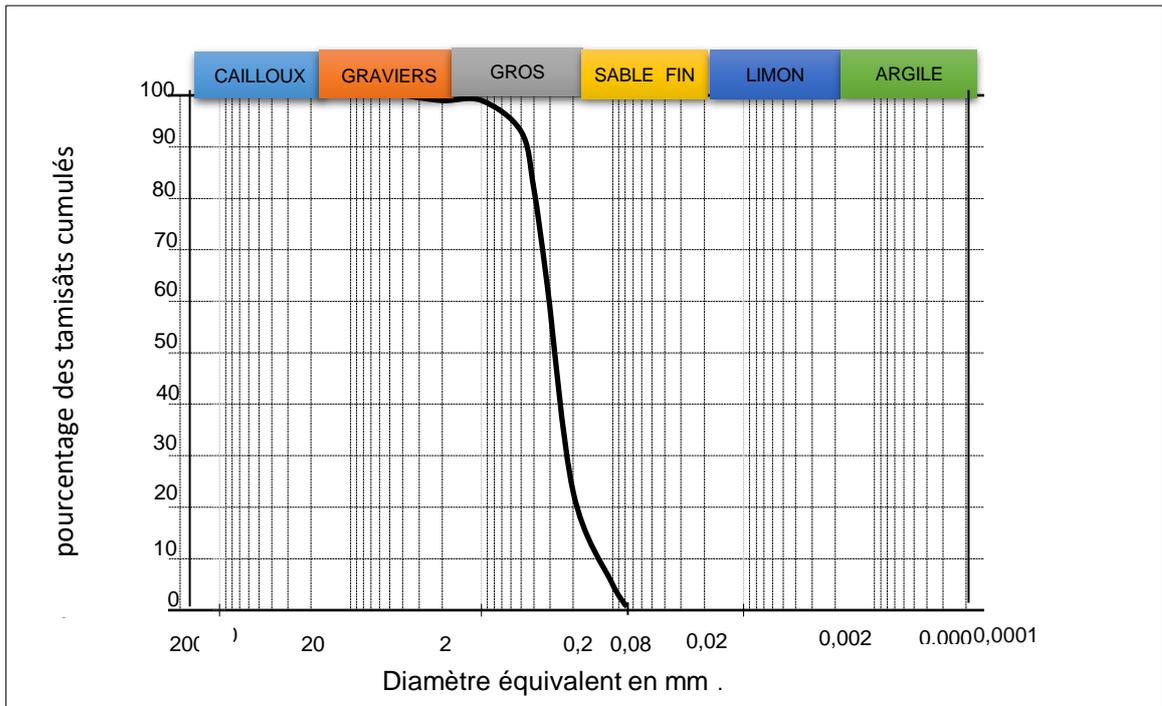


Figure V.20 : Courbe granulométrique du sable

V.3.2.2 Module de finesse du sable :

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

Tableau V.16 : Modules de finesse du sable [EN 12620].

Quantité du sable	Module de finesse
Gros	> 3.2
Moyen	Entre 2.3 et 3.2
Fin	< 2.3

Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin, et un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.

$$Mf = \frac{1}{100} \sum (\text{refus cumulés en \% des tamis}) \quad (\text{Eq V.6})$$

$$Mf = \frac{95 + 77 + 37 + 18 + 7 + 1 + 1}{100} = 2.36$$

Après l'analyse granulométrique, on trouve que le module de finesse du sable testé est égal à : $Mf = 2.36$. Mf est entre 2.3 et 3.2 (c'est un sable moyen).

V.3.2.3 Propreté du sable (équivalent du sable) [NF P18-598] :

- **Définition :**

L'équivalent de sable est un indicateur, caractérisant la propreté d'un sable ou d'une grave. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains. Ce terme désigne également l'essai qui permet de déterminer cet indicateur.

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible.

- **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution lavante dans une éprouvette graduée et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. On complète alors le sable en utilisant le reste de solution lavante afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable. Après 20 min, les hauteurs des produits sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport entre la hauteur du sable et la hauteur totale, exprimé en pourcentage.

- **Appareillage :**

- Tamis de 5mm d'ouverture de mailles avec fond.
- Bac pour tamisage.
- Balance.
- Chronomètre.

- Un entonnoir à large ouverture pour transvaser l'échantillon dans l'éprouvette cylindrique.
- Une machine d'agitation électrique, capable d'imprimer à l'éprouvette un mouvement horizontal, rectiligne.
- Une règle graduée.
- Éprouvettes cylindriques et transparentes en matière plastique.
- Un piston taré, constitué par :
 - Une tige de 440 mm de longueur,
 - Une embase de 25 mm de diamètre, dont la surface inférieure est plate, lisse et perpendiculaire à l'axe de la tige.

▪ **Mode opératoire :**

Nous avons suivi les instructions suivantes :

- Tamiser une quantité de sable sur un tamis de 5mm (une masse de 500g), prendre une pesée de 120g.
- Remplir l'éprouvette de solution lavante jusqu'au 1^{er} repère.
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120g) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin d'éliminer toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer pendant 10 minutes.
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc, et la fixer sur la machine.
- Faire subir à l'éprouvette 90 cycles en 30 s.
- Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table.
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution lavante au-dessus de l'éprouvette, rincée ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter le niveau du liquide au trait repère supérieur.
- Arrêter l'écoulement.
- Laisser reposer pendant 20min.

A. Equivalent de sable visuel E.S.V :

- Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h1, de niveau supérieure de flocculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- Mesurer également avec la règle la hauteur h2 compris entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

$$ES (\text{visuel}) = \left(\frac{h2}{h1} \right) \times 100\% \quad (\text{Eq V.7})$$

Avec :

h1 : hauteur du sable plus flocculat.

h2 : hauteur du sable.

B. Equivalent de sable par piston (E.S.P) :

- Introduire le piston dans l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, à cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.

$$ES (\text{piston}) = \left(\frac{h'2}{h1} \right) \times 100\% \quad (\text{Eq V.8})$$

Avec :

h1 : hauteur du sable plus flocculat.

h'2 : hauteur du sable.



Figure V.21 : Préparation d'un échantillon de sable pour l'essai ES



Figure V.22 : Essai d'équivalent de sable



Figure V.23 : Détermination des hauteurs (h1, h'2) visuel et par piston

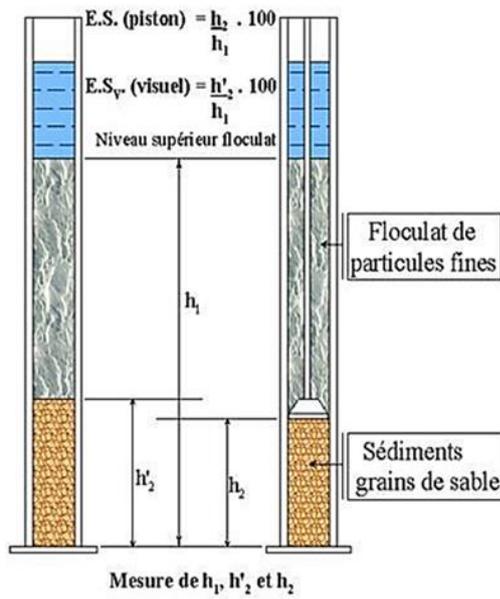


Figure V.24 : Essai d'équivalent de sable visuel et par piston.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau V.17

Tableau V.17 : Résultats d'essai d'équivalent de sable

N° d'essai	h1 (cm)	h2 (cm)	ES.V %	ES.V moy. %	h'2 (cm)	ES.P %	ES.P moy. %
1	13.2	8.8	66.67	66%	9.8	74.24	76%
2	13.1	8.5	64.88		10.2	77.86	

Tableau V.18 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV, ESP.

ES à vue	ES au Piston	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	- Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. - Sable rejeté pour les bétons de qualité.
65% ≤ ES ≤ 75%	60% ≤ ES ≤ 70%	- Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
75% ≤ ES ≤ 85%	70% ≤ ES ≤ 80%	- Sable propre à faible proportion de fine argileuse covenant parfaitement pour les bétons de hautes qualités.
ES > 85%	ES > 80%	- Sable très propre : l'absence presque totale des fines argileuse risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

V.3.2.4 Essai au bleu de méthylène « méthode à la tache » : [P 18-592]

- **Définition :**

L'essai au bleu de méthylène, également appelé « essai au bleu », est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient. Le bleu de méthylène est en effet adsorbé préférentiellement par les argiles et les matières organiques.

- **Principe de l'essai :**

L'essai au bleu de méthylène est pratiqué sur la fraction granulaire 0/2mm des sables courants. Il a pour but de révéler la présence de fines de nature argileuse et d'en déterminer la concentration.

L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène par doses successives à une suspension de l'échantillon de granulats dans l'eau. L'adsorption de la solution colorée par l'échantillon est vérifiée après chaque ajout de solution en effectuant un test à la tache sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre. Dès qu'une auréole bleutée se développe autour de la tache ainsi formée on peut considérer que l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée. En effet, c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparaît dans l'auréole.

Définition du test à la tache :

Après chaque injection de bleu, ce test consiste à prélever, à l'aide de la baguette de verre, une goutte de suspension que l'on dépose sur le papier filtre. Le test à la tache est négatif tant que celle-ci est de couleur uniforme. Il est positif lorsqu'apparaît une auréole bleu-clair autour de la partie sombre.



Figure V.25 : Test à la tache

▪ Appareillage :

- Tamis de 2 et 0.08mm.
- Bac.
- Balance.
- Eau distillée.
- Bécher plastique de 3L ayant un diamètre intérieur de 155 mm.
- Burette.
- Bleu méthylène.
- Papier filtre.
- Une baguette de verre : longueur 300 mm, diamètre 8 mm.
- Un agitateur à ailettes.

▪ Mode opératoire :**Nous avons suivi les instructions suivantes :**

- Préparation de la solution de bleu.
- Préparation de l'échantillon de sable 0/2.
- Préparation de la prise d'essai, (on a pesé 300.1 g, soit M1).
- Mettre la prise d'essai dans un bac.
- Ajouter 100ml d'eau distillée.
- Agiter.
- Laver le sable sur le tamis 0.08mm au-dessus d'un bécher de 3l.
- Rincer.
- Sécher le refus et peser, soit M2.
- Agiter la solution du bécher à V700 tr/min pendant 5min.
- Régler la vitesse à V 450tr/min.
- Procéder à l'essai de la tache.
- Verser dans la suspension un volume de bleu $5\text{cm}^3 < V < 10\text{cm}^3$.
- Mesurer le diamètre de la tache.
- Contrôle de la tache positif / négatif,
- Injecter jusqu'au l'apparition de l'auréole, noter le volume de bleu.
- Effectuer des essais de minute en minute, l'auréole disparaît à $t \leq 5\text{min}$.
- Procéder à des nouvelles injections jusqu'à la persistance de l'auréole à $t \geq 5\text{min}$.
- Noter le volume total de bleu introduit de la solution V(ml).

La valeur de bleu est donnée par la formule :

$$VB = \frac{V}{q} \quad (\text{Eq V.9})$$

Avec :

V : volume totale de bleu méthylène introduit.

q : masse de fine soumis à l'essai = M1 – M2



Figure V.26 : Préparation d'échantillon pour l'essai au bleu

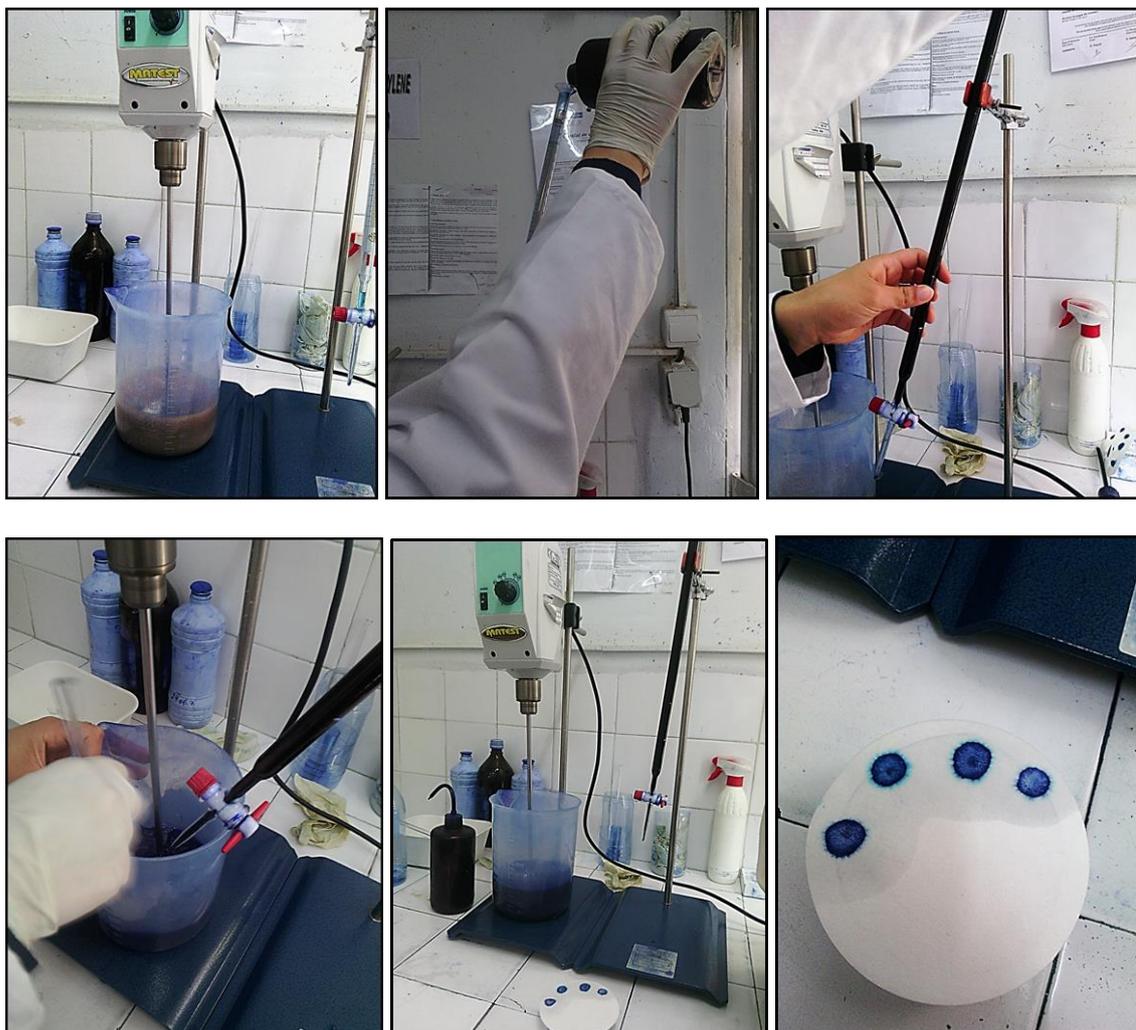


Figure V.27 : Essai au bleu de méthylène « méthode à la tache »

Les résultats sont représentés dans le tableau V.19

Tableau V.19 : La valeur de VB du sable.

Granulats	M1 en gr	M2 en gr	$q = M1 - M2$	Volume trouvé en ml	La valeur de VB
Sable 0/4	300.1	291	9.1	9	0.99

La valeur de bleu du sable est admissible selon la limite exigée par la norme [NF P 18-592] et qui est de 1,0 g de bleu pour 100 g de fines.

V.3.2.5 Masse volumique du sable :

A- masse volumique apparente du sable :

Le principe de l'essai est le même que celui du gravier.

- **Matériels utilisés :**

- Une balance.
- Un récipient avec un volume de 1litre.
- Une règle à araser.

- **Mode opératoire :**

Le mode opératoire est le même que celui utilisé pour le gravier décrit précédemment.

La masse volumique apparente du sable est déterminée par la formule :

$$MV_{app} = \frac{(M2-M1)}{V} \quad (\text{Eq V.10})$$

Avec :

M1 : le poids du récipient vide.

M2 : le poids du récipient plein.

V : le volume du récipient. ($V=1\text{litre}=1000\text{cm}^3$).



Figure V.28 : Essai de détermination de la masse volumique apparente du sable.

Tableau V.20 : La masse volumique apparente du sable.

Granulats	M ₁ (gr)	M ₂ (gr)	M ₂ – M ₁	V _{réceptier} (1L=1000cm ³)	M _{VApp} (gr/cm ³)
0/4	308.9	1758.5	2915	1000	1.45

B- La masse volumique absolue du sable (Méthode du pycnomètre): [NA 255/1990]▪ **Mode opératoire :**

Nous avons suivi les instructions suivantes :

- Passer le matériau (sable) au tamis Φ 2mm.
- Peser 25g du sable tamisé.
- Peser le pycnomètre vide + bouchon soit M₁.
- Introduire les 25g du sable et peser le tous (pycnomètre + sable + bouchon) soit M₂.
- Remplissage avec l'eau distillée.
- Elimination des bulles d'air soit par dépression ou ébullition.
- Ajouter l'eau distillée jusqu'au repère.
- Placer le bouchon, laisser se stabiliser pendant 30min et peser soit M₃.
- Vider le pycnomètre, bien le nettoyer et le remplir d'eau distillée jusqu'au repère, peser l'ensemble soit M₄.

La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule :

$$MV_{\text{absolue}} = \frac{(M_2 - M_1)}{(M_4 + M_2 - M_1 - M_3)} \quad (\text{Eq V.11})$$



Figure V.29 : Détermination de la masse volumique absolue du sable
(méthode de pycnomètre)

Les résultats sont présentés dans le tableau V.21 :

Tableau V.21 : Masse volumique absolue du sable.

granulats	M1 en gr	M2 en gr	M3 en g	M4 en gr	MV _{absolue} Gr/cm ³
Sable 0/4	158.5	183.8	672.4	656.5	2.69

V.4 Formulation des bétons :

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées s'appelle la formulation.

On a fixé le dosage du ciment à 400 kg/m^3 pour les 2 types du béton.

V.4.1 Formulation du béton ordinaire :

Une méthode simple a été utilisée pour l'élaboration du béton ordinaire, celle de « Faury », le mode opératoire est le suivant :

- **Tracer la courbe de mélange (la courbe de référence) :**

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

Origine : point de l'axe des abscisses correspondant au tamis de $0,0065\text{mm}$. On représente sur l'axe des abscisses les dimensions des tamis et sur l'axe des ordonnées le % des tamisats cumulés en volume absolu.

Extrémité : point d'abscisse D_{\max} et d'ordonnée 100.

Point de brisure : abscisse $D_{\max}/2$, ordonnée $Y_{D_{\max}/2}$.

1. Calcul de la dimension maximale (D_{\max}) :

Le point correspondant à la dimension maximale du béton ne correspond pas souvent à la dimension du plus gros grain du plus gros granulat du béton. Il est toujours inférieur et il se calcule par la formule suivante :

$$D_{\max} = d_1 + (d_1 - d_2) \frac{x}{y} \quad (\text{Eq V.12})$$

Avec :

d_1 : diamètre de l'ouverture du plus grand tamis sur lequel on obtient un refus.

d_2 : diamètre de l'ouverture du tamis immédiatement inférieur.

x : proportion des grains retenus sur le tamis correspondant à d_1 .

y : proportion des grains retenus entre d_1 et d_2 .

2. $D_{max} / 2$.**3. Calcule de l'ordonnée ($Y_{D_{max}/2}$) :**

Formule de l'ordonnée : $Y_{D_{max}/2} = A + 17 \sqrt[5]{D_{max}}$ (Eq V.13)

Avec :

A : constante traduisant la maniabilité du béton (voir tableau V.22).

Tableau V.22 : Les valeurs de A.

Qualité du béton	Sable roulé et gravier roulé	Sable roulé et gravier concassé	Sable concassé et gravier concassé
Très fluide	32	34	38
Fluide	30 – 32	32 – 34	36 – 38
Mou	28 – 30	30 – 32	34 – 36
Ferme	26 – 28	28 – 30	32 – 34
Très ferme	24 – 26	26 - 28	30 – 32
Puissant	22 - 24	24 - 26	28 - 30

Nous avons suivi les étapes ci-dessus pour tracer la courbe de mélange, voir l'annexe IV.

▪ **Calcul de l'indice des vides I :**

Approximativement, on considère que la quantité d'eau de gâchage est égale au volume des intervalles compris entre les grains du béton. Cette quantité d'eau de gâchage exprimée par la valeur de l'indice des vides I se détermine par la formule suivante :

Avec effet de paroi :

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{max}}} + \frac{K'}{(R+D)^{-0.75}} \quad (\text{Eq V.14})$$

En masse indéfinie :

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{max}}} \quad (\text{Eq V.15})$$

Avec :

K : les valeurs usuelles sont données par le tableau V.23

K' : coefficient qui dépend de la puissance de serrage.

Dmax : dimension maximale du béton.

R : rayon moyen de moule.

Tableau V.23 : Tableau des valeurs de K

Consistance du béton	Sable roulé et gravier roulé	Sable roulé et gravier concassé	Sables concassé et gravier concassé
Très fluide	0.370	0.405	0.450
Molle	0.350 – 0.370	0.375 – 0.405	0.430 – 0.460
Ferme	0.330 – 0.350	0.355 – 0.385	0.400 – 0.430
Très ferme	0.250 – 0.330	0.330 – 0.350	0.350 – 0.370
Extra sèche	< 0.240	< 0.250	< 0.27

- **Calcul du volume des matériaux secs :**

Dans un m³ de béton, on a un volume absolu total de constituants solides égales à :

$$V_{MS} = 1000 - I \quad (\text{Eq V.16})$$

- **Volume absolue de ciment :**

$$V_{AC} = \frac{\text{dosage en ciment}}{\text{masse volumique absolue de ciment}} \quad (\text{Eq V.17})$$

- **Le % du volume absolu du ciment :**

Le pourcentage en volume absolue du ciment se définit par :

$$V_{AC}\% = \frac{\text{volume absolu du ciment}}{\text{volume des matériaux secs}} \quad (\text{Eq V.18})$$

- **Le % en volume absolu des granulats :**

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

En utilisant ces formules, nous avons obtenus les résultats mentionnés dans l'annexe V (formulation du béton ordinaire).

Le tableau suivant V.24 résume le calcul des proportions de chaque constituant pour le béton ordinaire :

Tableau V.24 : Composition du béton ordinaire pour 1m³

	Sable 0/4	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Eau	Ciment	E/C
Poids (Kg/m³)	524	501	710	220	400	0.55
Volume (L/m³)	362	346	500	220	400	0.55

V.4.2 Formulation du BHP :

La méthode utilisée pour la formulation du BHP est la même utilisée pour le BO, donc nous avons obtenus des résultats (voir l'annexe VI, formulation du BHP).

Les six composants du BHP sont : graviers + sable + ciment + eau + **adjuvant** + **fillers calcaires**.

Dans le cadre de notre étude :

- Le dosage en fillers calcaires est de 10 % du poids de ciment,
- Le dosage en superplastifiant est de 1.5% du poids du ciment.

Le tableau suivant V.25 résume le calcul des proportions de chaque constituant.

Tableau V.25 : Composition du béton HP pour 1m³

	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Sable 0/4	Ciment	Fillers calcaires	Super plastifiant	Eau	E/C
Composants (Kg/m³)	564	767	566	400	40	6	159	0.39
Composants (L/m³)	389	540	390	400	/	/	159	0.39

V.5 Confection des bétons ordinaires (BO) et bétons à hautes performances (BHP) :

La méthode de Faury a pour but de définir les quantités des différents composants à introduire dans le malaxeur.



Figure V.30 : Préparation des ingrédients secs pour la confection des mélanges de béton (BO , BHP)

V.5.1 Malaxage du béton :

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est à axe vertical et il a une capacité de 50 litres.

La séquence de malaxage retenue est la suivante :

- Préparer les moules nécessaires pour les différents essais, vérifier leur nombre et qu'ils sont bien graissés afin de faciliter par suite le décoffrage.
- Vérifier que tout le matériel est à disposition et que les matériaux sont bien séchés.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Pour la confection du BHP le superplastifiant est ajouté à la première moitié de l'eau de gâchage.
- Verser les constituants dans la cuve : d'abord les gravillons, puis le sable et les fines.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30 secondes.
- Ajouter l'eau pendant 1 min 30s, le malaxeur en marche.
- Pour le BHP, laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant) et mélanger pendant 1 minute 30 secondes, introduire ensuite la partie restante d'eau.
- Malaxer pendant 2 min.
- Effectuer immédiatement l'essai (essai d'affaissement) de caractérisation du béton frais (voir la description de l'essai en annexe 3).



Figure V.31 : Préparation des constituants dans la cuve du malaxeur



Figure V32 : Malaxage à sec
des constituants

Figure V.33 : Préparations des ingrédients liquide



Figure V.34 : La confection des bétons



Figure V.35 : Mesure de l'affaissement du béton par slump-test « cône d'Abrams »

V.5.2 Remplissage des moules et le mode de mise en place :

L'introduction du béton dans les moules est faite au moyen d'une pelle à coque cylindrique de dimension appropriée au volume des éprouvettes, accompagnée d'un mouvement de répartition.

Le choix du mode de mise en place dépend de la consistance du béton mesurée par l'essai d'affaissement.

Les bétons réalisés dans cette étude, ont été mis dans des moules cylindriques 16x32 cm par piquage, ces dernières sont remplies selon le nombre de couches nécessaires, chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide d'une tige en acier de 16mm de diamètre, sont ensuite vibrée verticalement pendant 30 secondes.



Figure V.36 : Remplissage des moules (16x32 cm)

V.5.3 Conservation des éprouvettes :

V.5.3.1 Conservation avant démoulage :

L'arasement terminé, les éprouvettes sont conservées, sans être déplacées pendant 24 heures à la température d'environ 20 °C.



Figure V.37 : Conservation des éprouvettes avant démoulage

V.5.3.2 Conservation après démoulage :

Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées. Par la suite, elles sont conservées dans l'eau à une température de 20 °C.



Figure V.38 : Conservation des éprouvettes dans l'eau

V.6 Caractérisation du béton à l'état durci :

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété bien que, dans de nombreux cas pratiques, d'autres caractéristiques telles la durabilité et la perméabilité peuvent en fait être plus importantes. Néanmoins, la résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté.

Chaque éprouvette réalisée a été soumise, à l'âge de 7 jours, 21 jours et de 28 jours, aux essais suivants (dans notre cas, on a pris 2 éprouvettes pour chaque essai) :

- Essai de compression axiale.
- Essai de traction par fendage, appelé également « l'essai Brésilien »,

V.6.1 Résistance en compression :

La résistance en compression des bétons est mesurée sur des éprouvettes cylindrique 16x32cm. L'effort est appliqué par une presse hydraulique. La contrainte de rupture est donnée directement par la machine d'essai (figure V.39).

▪ Principe :

Les éprouvettes cylindriques (au nombre de deux par essai), préalablement immergées sont sorties de l'eau, puis asséchées. Ensuite, on a rendu les deux extrémités des éprouvettes planes en les surfaçant au moyen du disque néoprène (produit disponible au laboratoire), les éprouvettes une fois rectifiées, sont alors centrées chacune sur la presse de chargement. Chaque éprouvette est soumise à une charge croissante effectuée à la vitesse de 0,5 MPa/s.

En désignant par P, la charge maximale qui provoque la rupture et S la section, la résistance par compression est déterminée par la relation suivante :

$$f_c = \frac{P}{S} \quad (\text{Eq V.19})$$

Avec :

f_c : Résistance par compression en Méga Pascal (MPa).

P : Charge en Newton (N).

S : Section en mm².



Figure V.39 : Machine d'essai d'écrasement



Figure V.40 : Chargement des éprouvettes cylindriques pour essai de compression

V.6.2 Résistance en traction par fendage :

En écrasant un cylindre de béton placé horizontalement entre les plateaux d'une presse (figure V.41).

Si on désigne par P , la charge qui provoque la rupture par fendage, d le diamètre du cylindre et de sa hauteur h , la résistance à la rupture par fendage est donnée par l'expression :

$$f_t = \frac{2P}{\pi \cdot d \cdot h} = \frac{0.637P}{d \cdot h} \quad (\text{Eq V.20})$$

Avec :

f_t : Résistance à la traction par fendage en Méga Pascal (MPa).

P : Charge en Newton (N).

d : Diamètre en mm.

h : Hauteur en mm.



Figure V.41 : Chargement des éprouvettes cylindriques, essai de traction par fendage

V.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, les différentes caractéristiques physiques, mécaniques des composants ont été établies. Les courbes granulométriques de toutes les classes granulaires sont présentées. Les résultats obtenus sont conformes à des matériaux pouvant être introduits dans la composition des bétons de haute performance. La méthode de formulation a été défini et le calcul des proportions des constituants de notre programme expérimental a été fait, ainsi les essais sur béton (à la compression et à la traction par fonçage) sont décrits, dont les résultats sont présentés et discutés dans le chapitre suivant.

Chapitre

VI

Présentation et analyses
des résultats

Chapitre VI

Présentation et analyse des résultats

VI.1 Introduction :

Dans le présent chapitre, on présente les différents résultats expérimentaux relatifs aux essais effectués sur le BO et le BHP conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre précédent, une analyse et une discussion des résultats sera faite à la base des résultats obtenus.

VI.2 Analyse des résultats de caractérisation :

VI.2.1 : A l'état frais :

Les résultats de l'essai (affaissement au cône d'Abrams) de caractérisation des bétons à l'état frais sont récapitulés dans le Tableau VI-1.

Tableau VI.1 : Caractéristiques des bétons à l'état frais.

Identification	Date de coulage	18/04/2017	24/04/2017
	Type de béton	Béton ordinaire	Béton à haute performance
Caractéristique à l'état frais	Affaissement (cm)	10.5	16.5

Nous avons obtenu un affaissement de classe S4 (béton fluide de 160 à 210 mm, [NF EN 206-1]) pour le béton HP. Sur la consistance du béton ordinaire, l'affaissement obtenu est de classe S3 (béton très plastique de 100 à 150 mm d'après la norme NF EN 206-1).

On remarque tout d'abord la différence des affaissements mesurés sur ces bétons, cela est dû principalement à la quantité de superplastifiant adsorbée par les grains de ciment, puisque ce superplastifiant est progressivement consommé par les premiers hydrates formés par le ciment (dans les premières minutes qui suivent le gâchage), cet effet est responsable de la fluidité du mélange (affaissement 16.5 pour le BHP).

VI.2.2 : A l'état durci :**VI.2.2.1 Résistance en compression :**

L'ensemble des résultats des résistances en compression f_{cj} aux différentes échéances est présenté dans le Tableau VI-2.

Tableau VI.2 : Récapitulatif des valeurs des résistances en compression aux différentes échéances des bétons (BO et BHP).

Types de béton	Agés (jours)	Charges (KN)	Charges moy (KN)	Sections des éprouvettes (mm ²)	Contraintes (MPa)	Contraintes moy (MPa)
BO	à 7	483.4	497.3	20096	24.05	24.75
		511.2		20096	25.44	
	à 21	571.5	545.15	20096	28.44	27.12
		518.8		20096	25.81	
	à 28	742.8	773.9	20096	36.96	38.51
		805.00		20096	40.06	
BHP	à 7	887.7	894.2	20096	44.17	44.5
		900.7		20096	44.82	
	à 21	987.4	1044.6	20096	49.13	51.97
		1101.8		20096	54.82	
	à 28	1160.6	1177	20096	57.75	58.56
		1193.4		20096	59.38	

Toutes les valeurs données sont des moyennes arithmétiques de deux essais, cependant on remarque que la dispersion des résultats obtenus est particulièrement faible (un écart de 4 MPa).

Les résultats indiquent que la résistance en compression augmente lorsque le rapport E/C diminue ce qui est conforme aux théories actuellement en vigueur [chapitre I]. Cependant, on constate que le comportement global à 7 jours du BHP est meilleur à celui d'un béton ordinaire à 28 jours.

Il est à noter que d'une manière générale toute variation dans les résultats expérimentaux de la mesure de la résistance en compression entre les cylindres provenant de l'échantillon (pour différents gâchées) et par la mise à l'essai des cylindres de béton.

La **Figure VI-1** Présente les évolutions des résistances en compression en fonction du temps (7, 21 et 28 jours) des deux types de béton.

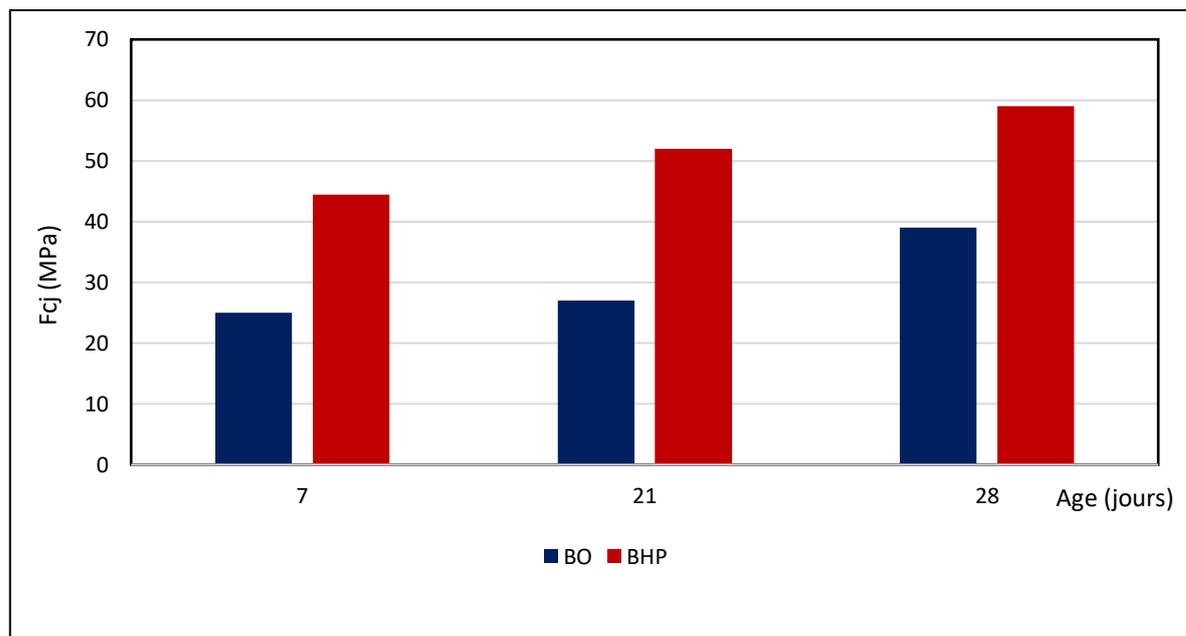


Figure VI.1 : Histogramme d'évolution des résistances à la compression en fonction du temps

L'analyse des résistances en compression montre des valeurs supérieures pour le béton HP (à base des fillers calcaires) par rapport au béton ordinaire.

Les résistances élevées du béton HP sont liées :

- A l'utilisation du superplastifiant GLENIUM® 26 dans la formulation du béton à hautes performances qui peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique.
- A la présence d'une quantité d'ajout (fillers calcaires) comme addition dans le BHP, ce qui peut également avoir une action positive sur la compacité (réduire le volume des vides entre les granulats) et par conséquent sur la résistance mécanique.

On peut ajouter des courbes pour mieux illustrer cette évolution :

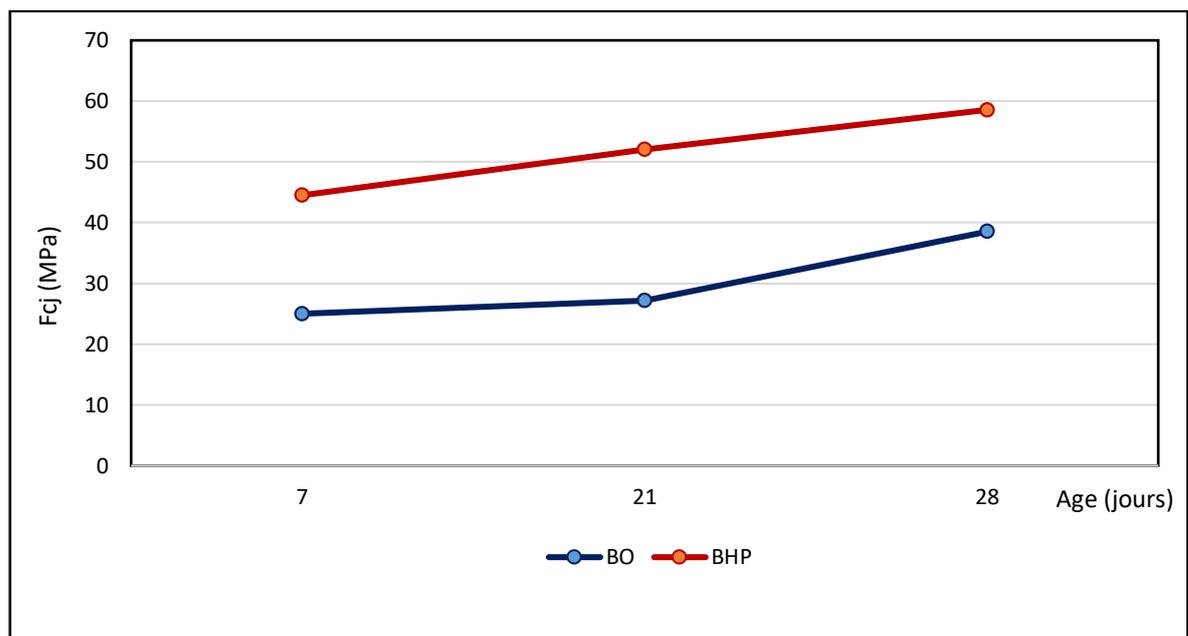


Figure VI.2 : Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction du temps

On voit nettement une augmentation remarquable de la résistance du BHP par rapport au béton ordinaire.

VI.2.2.2 Résistance en traction par fendage :

Les résultats des essais de traction effectués à 7, 21, 28 jours sont consignés de la manière suivante dans le tableau VI.3.

Tableau VI.3 : Résultats de la résistance en traction par fendage des bétons.

Types de béton	Age (jours)	Charge (KN)	Charge moy (KN)	$f_t = \frac{0.637 \times \text{charge}}{d \cdot h}$ (MPa)	ftj moy (MPa)
BO	7	200	192.75	2.48	2.4
		185.5		2.3	
	21	205.9	204.05	2.56	2.5
		202.2		2.51	
	28	236.3	235.65	2.94	2.93
		235		2.92	
BHP	7	266.4	267.4	3.31	3.3
		268.4		3.34	
	21	272.7	275.25	3.4	3.45
		277.8		3.45	
	28	297.9	296.85	3.7	3.7
		295.8		3.68	

En analysant les données du tableau VI.3, on constate que, la résistance à la traction par fendage croît avec celle de la résistance à la compression mais elle ne s'améliore pas dans les mêmes proportions. En général, elle a tendance à augmenter quand le rapport E/C diminue, elle a aussi tendance à augmenter avec l'âge du béton. Pour le béton ordinaire et le béton à haute performance, donc la résistance à la traction est une caractéristique importante du matériau, même si elle n'est pas prise directement en compte dans les calculs.

La Figure VI.3 présente les évolutions des résistances en traction en fonction du temps (7, 21 et 28 jours) des deux types de béton.

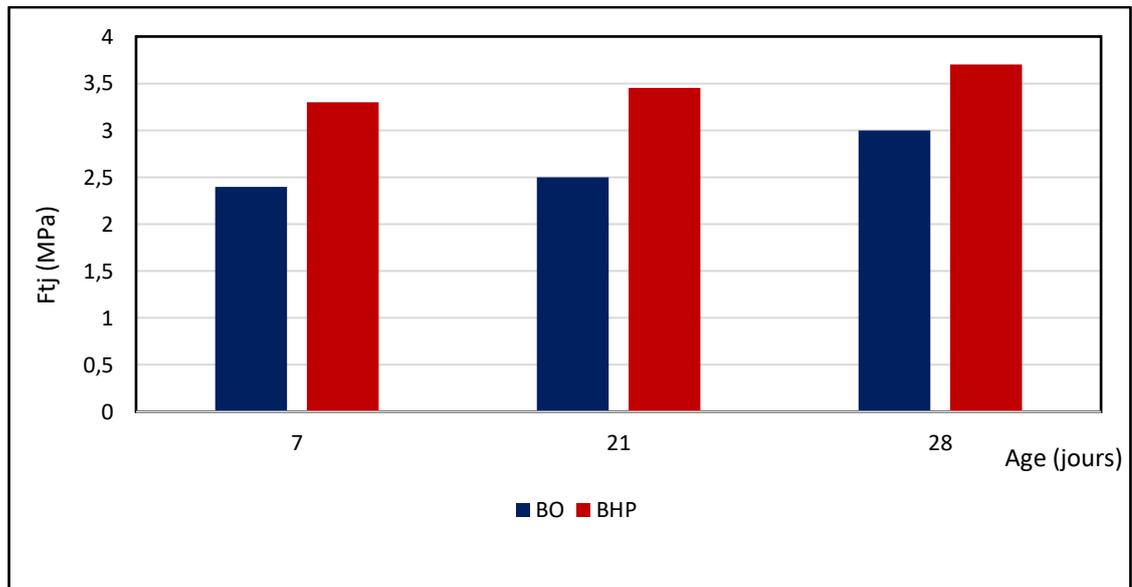


Figure VI.3 : Evolutions des résistances en traction par fendage en fonction du temps des deux bétons

On s'aperçoit à la vue des accroissements obtenus que le BHP présente également en traction des valeurs supérieures par rapport au béton ordinaire.

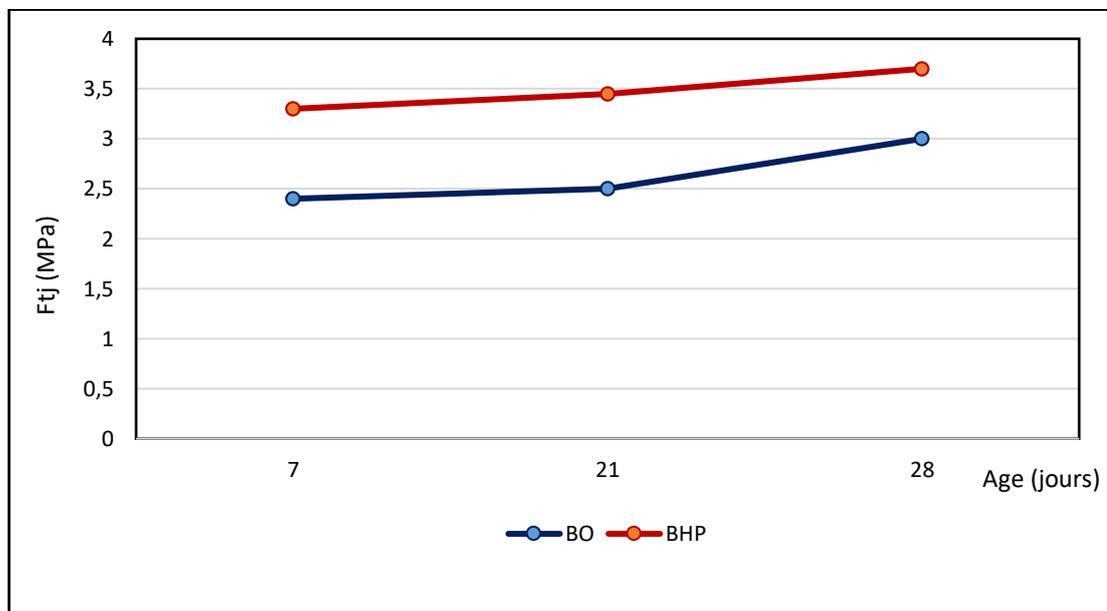


Figure VI.4 : La résistance en traction par fendage pour les 2bétons en fonction du temps

VI.2.2.3 Module d'élasticité :

Le Tableau VI-4 présente les résultats de module d'élasticité des deux bétons, ce module a été calculé à 7, 21 et 28 jours à partir des résultats d'essai de compression par la formule suivante :

$$E_{ij} = 11000 (f_{cj})^{1/3}$$

(Toutes quantités exprimées en MPa)

Tableau VI.4 : Modules d'élasticité calculés des deux bétons

Types de béton	Age (jours)	Fc (MPa)	Module d'élasticité (MPa)
BO	7	24.75	32057
	21	27.12	33049
	28	38.51	37146
BHP	7	44.5	38980
	21	51.97	41049
	28	58.56	42716

On constate que le BHP (à base des fillers calcaires) développent des valeurs de modules d'élasticité plus élevées que celles du béton ordinaire.

Les résultats obtenus, montrent dans l'ensemble une tendance à l'accroissement du module d'élasticité lorsque la résistance en compression augmente.

On peut déduire que le béton hautes performances à base des fillers calcaires est plus durable et performant.

VI.3 Comparaison des résultats avec ceux des années précédentes :

Le tableau (VI.5) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales des résistances à la compression des bétons à hautes performances avec l'ajout des proportions de fumée de silice [23], cendre volante [24] et laitier de haut fourneau [25], les résultats obtenus montrent dans l'ensemble qu'on peut à partir des matériaux locaux (région de Tiaret) d'aboutir à un béton performant avec ajouts minéraux d'une résistance moyenne en compression de 60 MPa obtenue à 28 jours, au moyen d'un essai simple et de formuler un matériau à partir d'une formule de béton ordinaire existante.

On ne prétend pas avoir apporté des réponses définitives sur la formulation du béton à hautes performances, cependant on pense avoir atteint l'objectif minimal, et on va plus tard faire une série de constatation (recommandations) dont il sera nécessaire de tenir compte soin veut élever substantiellement la résistance spécifiée d'un béton d'ouvrage.

Tableau VI.5 : Comparaison des résultats expérimentaux des bétons à hautes performance

BHP à base de	Age (jours)	Résistance moyenne à la compression MPa
Fumée de silice condensé	7	33
	21	54.83
	28	60
Cendre volante	7	41.1
	21	55.27
	28	63.04
Laitier à haut fourneau	7	36.7
	21	47.36
	28	61.64
Fillers calcaires	7	44.5
	21	51.97
	28	58.56

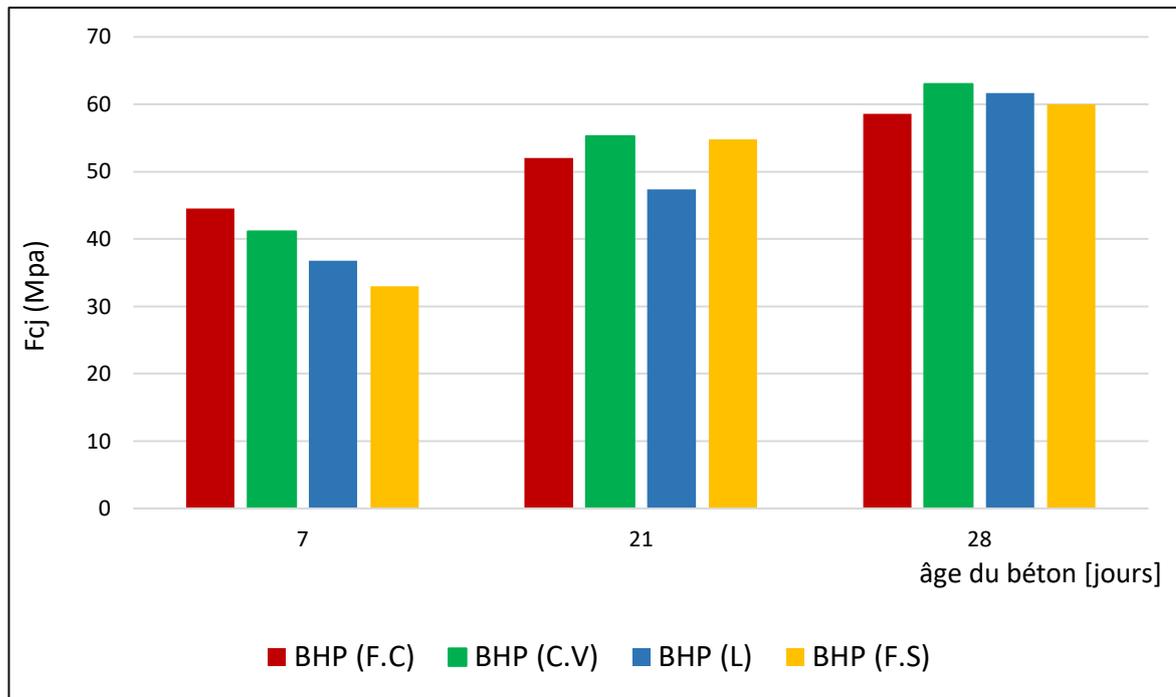


Figure VI.5 : Développement de la résistance à la compression de béton HP contenant des additions minérales

La figure VI.5, représente l'influence sur la résistance à la compression exercée par l'adjonction de de 10 % en masse (par rapport à la teneur en ciment), respectivement de filler de calcaire, de cendre volante, de laitier de haut fourneau et de fumée de silice. On voit nettement qu'elle peut atteindre les 60 MPa à 28jours.

VI.4 Conclusion :

Les résultats obtenus sur nos béton (état frais et durci) nous permettent de conclure que nos bétons sont bien composés.

Il est très intéressant de remarquer que les mélanges étudiés avec un choix de granulats bien déterminé, permettent d'obtenir des résultats très satisfaisants pour les valeurs des résistances à la compression et à la traction entre 7 et 28 jours.

Un constat se porte sur la résistance à 28 jours de BHP, avec le matériau utilisé (fillers calcaires), nous avons pu formuler un béton haute performance qui présente une très bonne résistance mécanique à la compression (> 50 MPa) par rapport au béton ordinaire pour le même dosage en ciment.

Conclusions générales et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale :

La fabrication de bétons à hautes performances, présentant à 28 jours des résistances en compression supérieures à 50 MPa, est à ce jour possible, grâce aux adjuvants fluidifiants (maintenant appelés superplastifiants) qui permettent l'obtention de rapports eau/ciment bas (inférieurs à 0.3). L'usage de particules fines, de granulométrie inférieure à celle du ciment, facilite encore cette opération de par leur action à la fois physique (effet granulométrique, où les grains s'insèrent entre ceux du ciment, diminuant le dosage en eau) et chimique (pour les particules siliceuses, effet pouzzolanique, association de la silice avec la chaux libérée par le ciment). Suivant les produits disponibles et les caractéristiques du béton désirées, il importe d'établir des critères de choix en qualité et dosages, afin d'obtenir le matériau recherché au moindre coût.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'obtenir une résistance à la compression supérieure à 50 MPa à 28 jours correspondant à un BHP, avec l'utilisation des matériaux locaux.

A partir de cette étude expérimentale et sur la base des résultats des essais physiques et mécaniques réalisés au cours de ce travail expérimental dans ces différentes phases, nous pouvons conclure ce qui suit :

La confection d'un béton à hautes performances à base des matériaux localement disponibles en Algérie et judicieusement étudiés est possible. Celle a permis d'aboutir des bétons de 60 MPa en 28 jours.

L'addition de fillers calcaires au béton a montré un bon développement de résistance entre les âges de 7 et 28 jours, le béton contient 10% de fillers calcaires avec un rapport E/C de 0.39 a une résistance à la compression plus haute que le béton ordinaire (sans ajout).

Les résultats obtenus permettent d'observer que la résistance à la compression augmente quand le rapport E/C diminue.

En perspectives, des études complémentaires plus approfondies doivent être engagées en de nombreuses zones d'ombre subsistantes dans la connaissance du comportement des BHP.

Il serait intéressant de conduire les mêmes études sur d'autres types de matériaux (d'autres sources de granulats, de ciment, d'adjuvants..).

Afin de mieux comprendre les différentes facettes de comportement de ce nouveau type de béton, il serait intéressant d'étudier d'autres propriétés à l'état durci, durabilité dans les milieux chimiques agressifs, autres comportements mécaniques que la résistance à la compression et traction, résistance au gel/dégel...

Comme recommandation on peut dire que l'utilisation des additions minérales (fillers calcaires, laitier de haut fourneau, fumée de silice...) d'origine locale (Algérie) présente une alternative économique et écologique dans la fabrication des bétons en Algérie.

Annexes

MATINE, ciment pour béton exigeant



متين
Matine

ALGÉRIE



La Solution pour vos grands projets !

CPJ - CEM II/B 42.5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance
Destiné à la construction des Ouvrages d'Art (ponts
viaducs, tunnels...)

Matine
CPJ - CEM II/B 42.5 N.

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne
(NA 442) et Européenne (EN CE 197-1)

AVANTAGES PRODUIT

- Une résistance initiale élevée pour réaliser des préfabrifications lourdes (poutres, voutes, ...)
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

APPLICATIONS RECOMMANDÉES 

- Construction d'ouvrage d'art (ponts, viaducs tunnels...)
- Préfabrication lourdes
- Béton à haute performance
- Applications techniques

**FORMULATION CONSEILLÉE** 

	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 8/15mm  15/25mm	Eau (litres) 
Dosage pour béton	+ X 1 	+  X7	+  X5 +  X4	+ 25 L

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES 

• Analyses chimiques

	Norme
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0.02-0.05

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Norme
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Norme
C3S (%)	60±3
C3A (%)	7.5±1

• Résistance à la compression

	Norme
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

• Propriétés physiques

	Norme
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 days (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

CONSIGNES DE SÉCURITÉ 

1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- **MANUTENTION** : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



LAFARGE ALGÉRIE

Centre commercial Bab Ezzouar, Tour n°02, Etages 05 & 06, Bab Ezzouar Alger, Algérie

Tél: + 213 (0) 21 98 54 54

Fax: + 213 (0) 23 92 42 94

www.lafargealgerie.com


LAFARGE
 لافارج

GLENIUM[®] 26



The Chemical Company

GLENIUM[®] 26

Superplastifiant haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C, hautes performances et très long maintien d'ouvrabilité.

Description

Le GLENIUM[®] 26 est un adjuvant liquide non chloré d'une nouvelle génération chimique à base d'éther polycarboxylique modifié. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton où haute qualité, durabilité, performance et très longue ouvrabilité sont requises.

La nouvelle chimie du GLENIUM[®]

Le GLENIUM[®] se différencie des superplastifiants traditionnels par son action nouvelle et originale qui améliore de façon très significative le pouvoir dispersant sur le ciment.

Cette nouvelle structure chimique agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique, c'est à dire en créant un obstacle physique au rapprochement des particules de ciment. L'état dispersé est ainsi amélioré.

De plus, cette réaction est la combinaison de deux actions successives. Dès l'incorporation du GLENIUM[®] dans le mélange cimentaire, une première partie active agit immédiatement et la seconde est présente mais inactive.

L'hydratation du ciment, qui se déroule normalement, fait évoluer le pH du mélange vers la basicité, ce qui provoque la libération progressive des molécules complémentaires.

Celles-ci travaillent de la même manière que les premières et prolongent donc l'état de dispersion évitant ainsi la floculation et donc le raidissement précoce du mélange.

Domaines d'application

Le GLENIUM[®] 26 est particulièrement recommandé pour la fabrication de bétons à faible E/C, à très long maintien d'ouvrabilité et aux performances mécaniques élevées à jeune âge.

Le GLENIUM[®] 26 est donc adapté à l'industrie du béton prêt à l'emploi et aux chantiers de Génie Civil.

Il sera particulièrement recommandé pour les usages suivants :

- Béton à très long maintien d'ouvrabilité.
- Fondations profondes (parois moulés, pieux...)
- Pompages longues distances.
- Bétons de bâtiment.
- BAP/BAN.
- Bétons de Génie- Civil (ouvrages d'art, tunnels).
- Bétons à faible E/C et long maintien d'ouvrabilité.

Propriétés

Le GLENIUM[®] 26 se différencie des autres adjuvants à base d'éthers polycarboxyliques, par sa structure spécifique qui lui confère un fonctionnement particulier avec le ciment. La cinétique d'adsorption sur les grains de ciment est différente, permettant ainsi un meilleur déroulement des premières réactions d'hydratation (dissolution, formation d'ettringite, dispersion). Il est donc possible de défloculer fortement les grains de ciment, de maintenir cet état dispersé afin d'obtenir une maniabilité très plastique ou fluide pendant plus de 2 heures avec un faible rapport eau/ciment et sans effet de retard de prise.

Caractéristiques

Aspect	liquide
Couleur	brun
Masse volumique	1,08 ± 0,02 g/cm ³
pH	7,0 ± 1
Teneur en chlorures	< 0,1%
Extrait sec	24 ± 2 %
Na ₂ O eq	< 2 %
Transport	non classé
Etiquetage	Pas de symbole exigé



The Chemical Company

GLENIUM® 26

Mode d'emploi

Le GLENIUM® 26 est un adjuvant pour béton qui doit être incorporé isolément. L'effet optimal est obtenu par incorporation du GLENIUM® 26 dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70% de l'eau de gâchage dans le malaxeur. Toutefois il est possible d'incorporer le GLENIUM® 26 dans l'eau de gâchage.

Eviter d'ajouter le GLENIUM® 26 sur les granulats.

Recommandations

En cas de gel, réchauffer le produit jusqu'à une température proche de + 30°C et agiter mécaniquement.

Compatibilité

Le GLENIUM® 26 est compatible avec la majorité des ciments.

Le GLENIUM® 26 n'est pas compatible avec certains plastifiants et superplastifiants. Consultez votre représentant local BASF CC pour toute synergie.

Il est utilisé en synergie avec :

- Micro-Air® 111.
- Pozzolith® 555
- Glenium® Activator
- Meyco® MS 610, Rheomac® SF 920
- Glenium® Stream, Rheomac® 885F
- Meyco® SA 160, 162, 167

Dosage

Plage normale d'utilisation:

0,3 à 2,0 % du poids du ciment, soit 0,28 à 1,90 litres pour 100 kg de ciment.

Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local BASF CC.

Conditionnement

Container de 1000 L, fût de 208 L, Bidon de 25 L ou vrac.

Stockage

Stocker le GLENIUM® 26 dans des conditions de températures supérieures à + 5°C.

Précautions d'emploi

Le GLENIUM® 26 ne contient aucune substance exigeant un label particulier.

Rapport de Qualité

Tous les produits élaborés par BASF ou importés par les sociétés filiales de BASF à travers le monde, sont certifiés conformes aux exigences des systèmes de gestion de qualité et d'environnement ISO 9001, ISO 14001 et OHSAS 18001.

09/09 BASF_CC-ALGERIA

* Les propriétés énumérées sont seulement à titre de conseils.

Sarl BASF Construction Chemicals
Algeria.

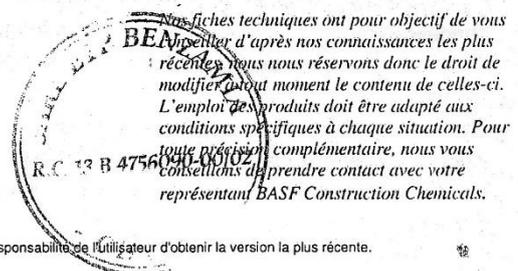
Phone: +213 (0) 21.30.95.09 / 12

Fax: +213 (0) 21.30.95.19 / 12

Zone d'Activité de Baba Ali -Saoula-
Alger, ALGERIE.

BASF - The Chemical Company
www.basf-cc.com

Comme toutes les fiches techniques de BASF-CC sont mises à jour de façon régulière, il est de la responsabilité de l'utilisateur d'obtenir la version la plus récente.



Annexe III

Essai d'affaissement

éditée par l'association française de normalisation afnor - tour europe cedex 7 92080 paris la défense - tél. (1) 778-13-26

NORME FRANÇAISE HOMOLOGUÉE	BÉTONS ESSAI D'AFFAISSEMENT	NF P 18-451 Décembre 1981
<p>1 OBJET</p> <p>La présente norme a pour objet de définir un essai des bétons frais dit « essai d'affaissement » (1).</p> <p>2 DOMAINE D'APPLICATION</p> <p>La présente norme s'applique aux bétons dont les granulats ont une dimension D inférieure ou égale à 40 mm.</p> <p>3 APPAREILLAGE</p> <p>3.1 MOULE</p> <p>Le moule, sans fond, de forme tronconique, a les dimensions intérieures suivantes (en millimètres) :</p> <ul style="list-style-type: none"> — diamètre du cercle de la base supérieure : $100 \pm 0,5$ — diamètre du cercle de la base inférieure : $200 \pm 0,5$ — hauteur : 300 ± 1 <p>Il est construit de manière à être indéformable (2). La paroi intérieure est non absorbante, non réactive au liant, lisse et sans aspérités.</p> <p>Il doit être muni :</p> <ul style="list-style-type: none"> — aux 2/3 de la hauteur à partir de la base, de deux poignées, — à la partie inférieure, de dispositifs de fixation ou d'appuis pour les pieds de l'opérateur, permettant de l'assujettir sur la surface d'appui. <div data-bbox="1129 1041 1380 1406" data-label="Diagram"> </div> <p>3.2 TIGE DE PIQUAGE</p> <p>Tige en acier, diamètre 16 mm, longueur 600 mm, à extrémités hémisphériques.</p> <p>3.3 PORTIQUE DE MESURE (3)</p> <p>Portique constitué par deux montants verticaux distants d'environ 300 mm et reliés rigidement à la partie supérieure, sur laquelle coulisse une règle de lecture susceptible d'être immobilisée par une vis de pression.</p> <p>3.4 SURFACE D'APPUI DE L'ENSEMBLE</p> <p>La surface d'appui doit être plane et horizontale, rigide et non absorbante (4) ; elle ne doit pas recevoir de chocs ou de vibrations pendant l'essai.</p> <p>(1) Cet essai est appelé également « essai au cône d'ABRAMS ».</p> <p>(2) Par exemple : moule à parois métalliques d'épaisseur minimale 1,5 mm.</p> <p>(3) L'emploi de ce portique facilite la détermination de l'affaissement, mais il n'est pas obligatoire.</p> <p>(4) Elle est généralement métallique.</p>		
Homologuée par arrêté du 1981-11-27 (J.O. 1981-12-04) effet le 1981-12-27	La présente norme remplace la norme de même indice, homologuée par arrêté du 1 ^{er} avril 1966.	© afnor 1981 Droits de reproduction et de traduction réservés pour tous pays

4 MODE OPÉRATOIRE

Humidifier la surface d'appui et y assujettir le moule dont la paroi intérieure, bien propre, aura été légèrement huilée (1).

Au moyen d'une pelle creuse, introduire le béton dans le moule en trois couches, chacune ayant une hauteur égale au tiers de la hauteur du cône. Cette introduction doit commencer une à deux minutes, au maximum, après prélèvement et homogénéisation du béton destiné à l'essai.

Piquer chaque couche 25 fois, avec la tige de piquage, en répartissant les enfoncements uniformément sur la surface du béton et en faisant pénétrer la tige dans la couche sous-jacente s'il y a lieu.

A la dernière couche, au cours du compactage, ajouter le béton nécessaire pour que le moule soit juste rempli à ras bords.

Araser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule. Eviter pendant cette opération un compactage supplémentaire du béton.

Démouler immédiatement en soulevant le moule avec précaution, lentement, à la verticale et sans secousses.

Après démoulage, procéder dans la minute à la lecture de l'affaissement, en mesurant le point le plus haut du béton affaissé.

Si l'on constate un éboulement ou un cisaillement partiel du béton, recommencer l'essai.

5 EXPRESSION DES RÉSULTATS

L'affaissement est exprimé par un nombre entier A, obtenu par l'une des deux méthodes suivantes :

5.1 UNE SEULE MESURE

Faire la lecture de l'affaissement au centimètre près, ce qui donne la valeur A.

5.2 TROIS MESURES

Pour obtenir une meilleure appréciation de l'affaissement, procéder à trois prises successives et réaliser sur chaque prise une détermination au demi-centimètre. Retenir pour résultat la moyenne arithmétique A des lectures, arrondie au centimètre le plus voisin.

6 COMPTE-RENDU

Le compte-rendu doit comporter sous une forme appropriée (tableau, imprimé...) les informations suivantes :

6.1 RÉSULTATS DE L'ESSAI

— Valeur de l'affaissement A du béton

- soit à partir d'une seule mesure

- soit à partir de trois mesures : dans ce cas, indiquer toutes les lectures effectuées ; exemple :

valeurs mesurées	4 - 6 - 4,5
moyenne arithmétique arrondie au centimètre	5
inscription au compte-rendu	A = 5 (4-6-4,5)

— Observations éventuelles.

6.2 RENSEIGNEMENTS FONDAMENTAUX

6.2.1 à donner par le fournisseur du béton :

- a) identification du béton,
- b) désignation du projet de construction,
- c) partie ou composant de la construction.

6.2.2 à donner par le laboratoire d'essais :

- a) date de l'essai.

(1) L'huile employée ne doit pas être réactive au liant.

Courbes granulométriques des trois granulats et la courbe de mélange

1. Calcul de la dimension maximale (D_{\max}) :

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

$$D_{\max} = 12.5 + (12.5 - 10) \frac{25}{35}$$

$$D_{\max} = 14.29 \text{ mm.}$$

2. $\frac{D_{\max}}{2}$

$$\frac{14.29}{2} = 7.14 \text{ mm.}$$

3. Calcul de l'ordonnée $Y_{D_{\max}/2}$:

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

$$Y_{D_{\max}/2} = 29 + 17 \sqrt[5]{14.29}$$

$$Y_{D_{\max}/2} = 57.94$$

Origine : point de l'axe des abscisses correspondant au tamis de 0,0065mm.

Extrémité : point d'abscisse 14.29 et d'ordonnée 100.

Point de brisure : abscisse 7.14, ordonnée 57.94.

Formulation du béton ordinaire



**Laboratoire des Travaux
Publics de l'Ouest**

Unité de iaret

Adresse: Cité 248 logts B.P 496 14000 - Tiaret
Art Imposition: 1401 6801515
Téléphone: 046 42.61.11
Télécopie: 046 42.61.11

Entreprise Publique Economique Au capital social de 22600000 DA
RC. 99B0103524 / Mat Fisc. 099031010015039 / Art Impo. 3101 6145011

Département technique:

Note Technique

Et Feuille de paillasse							
N° dossier:							
Client:							
Date: 05/05/17							
Calcul de la dimension maximale (D_{max}):							
1	$D_{MAX} = d_1 + (d_1 - d_2) \times y$						14.29 mm
2	$D_{max} / 2$						7.14 mm
3 Calcul de l'ordonnée Y:							
	$Y = A + 17 \sqrt[5]{D_{max}}$						57.94
4 Calcul de I (indice des vides):							
	$I = K / \sqrt[5]{D_{max}}$						220 L
5 Calcul du volume matériaux secs:							
	$V_{MS} = 1000 - I$						780 L
6 volume absolu de ciment:							
	$V_{AC} = P_C / D_C$					$P_C = 400 \text{ kg/m}^3$	129 L
7 Calcul en %age du volume absolu de ciment:							
	$V_C = V_{AC} / V_{MS}$						17 %
composant	%	(1000-eau)/100	volume absolu (L)	Masse volumique absolue (kg/m3)	composants en masse (kg)	Masse volumique apparente (kg/m3)	composants en volume (L)
1	2	3	4	5	6	7	8
			2*3		4*5		6/7
Ciment	17	7.80	133	3.10	400	1	400
Sable	25	7.80	195	2.69	524	1.45	362
3/8	24	7.80	187	2.68	501	1.45	346
8/15	34	7.80	265	2.68	710	1.42	500
Eau	220	/		1	220	1	220
Totaux	100				2136		1828

17/04/2017

TOTAL	2136
G/S	2.31
E/C	0.55

F1.2

Annexe VI

Formulation du BHP



**Laboratoire des Travaux
Publics de l'Ouest**

Entreprise Publique Economique Au capital social de 22600000 DA
RC. 99B0103524 / Mat Fisc. 099031010015039 / Art Impo. 3101 6145011

Unité de iaret

Adresse: Cité 248 logts B.P 496 14000 - Tiaret
Art Imposition: 1401 6801515
Téléphone: 046 42.61.11
Télécopie: 046 42.61.11

Département technique:

Note Technique

Feuille de paillasse

N° dossier: TIM /

Intitulé: ~~COMPOSITION DE BETON~~ Formulation du BHP

Clien :

Date:

DOSAGE 400 Kg/M3

Calcul de la dimension maximale (D_{max}):

$$D_{MAX} = d_1 + (d_1 - d_2) \times y$$

$$D_{max} / 2$$

$$14,29 \text{ mm}$$

$$7,14 \text{ mm}$$

Calcul de l'ordonnée Y:

$$Y = A + 17 \sqrt[3]{D_{max}}$$

$$54,94$$

Calcul de I (indice des vides):

$$I = K / \sqrt[3]{D_{max}}$$

$$159 \text{ L}$$

Calcul du volume matériaux secs:

$$V_{MS} = 1000 - I$$

$$841 \text{ L}$$

volume absolu de ciment:

$$V_{AC} = P_C / D_C$$

$$129 \text{ L}$$

$$P_C = 400 \text{ kg / m}^3$$

Calcul en %age du volume absolu de ciment:

$$V_C = V_{AC} / V_{MS}$$

$$15 \%$$

composant	%	(1000- eau)/100	volume absolu (L)	Masse volumique absolue (kg/m3)	composants en masse (kg)	Masse volumique apparente (kg/m3)	composants en volume (L)
1	2	3	4	5	6	7	8
			2 * 3		4 * 5		6 / 7
Ciment	10	8,41	129	3,1	400	1	400
Sable	25	8,41	210	2,169	566	1,145	390
3/8	25	8,41	210	2,169	564	1,145	389
8/15	34	8,41	286	2,169	767	1,142	540
15/25							
Eau	159	/	159	1	159	1	159
Totaux	100				2455		1838

Date

L'operateur

Le chef de service

Références bibliographiques

BIBLIOGRAPHIE

- [01] **Dr.ir.G.De Schutter UGent ir.arch.J.Apers.** Le béton à hautes performances, Dossier Ciment, Vol.40, (juillet 2007), 1 – 12.
- [02] **LES EXPERTS DE CIMBETON.** Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, fiches techniques, Tome 2, 50 – 107, 2009.
- [03] **W. Ladaoui.** Etude expérimentale du comportement thermos-Hydro-mécanique à long terme des BHP destinées aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs. Thèse de DOCTORAT, spécialité Génie Civil, université de TOULOUSE, (décembre 2010).
- [04] **Ammar Yahia, ing.** Technologie du béton – GCI 340. 2011, 25 – 31
- [05] **Yves MALIER.** L'utilisation du BHP dans une approche "système" de la construction, 1992, p. 3 - 5
- [06] **PREMIUM Engineering.** Les bétons hautes performances –BHP, 1- 6.
- [07] **Les Dossiers du CSTC.** Le retrait au jeune âge des bétons spéciaux, Cahier n° 2, 2 e trimestre 2004, 1 – 4.
- [08] https://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton_hautes_performances
- [09] <https://lepaveblog.com/2017/01/08/habiter-a-grande-hauteur-le-pari-fou-de-la-burj-khalifa-a-dubai/>
- [10] **Y. BENACHOUR.** Analyse de l'influence de l'ajout de taux élevé de fillers calcaires sur les propriétés physiques, mécaniques, microstructurales, de transfert et de durabilité des mortiers, Thèse de DOCTORAT, spécialité Génie Civil, université MENTOURI CONSTANTINE, (avril 2009).
- [11] **P.-C.Aïtcin.** High-Performance Concrete, 140 -156, 1998.
- [12] **CH. AMOURI.** Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité), Thèse de DOCTORAT, spécialité Génie Civil, université MENTOURI CONSTANTINE, (2009).
- [13] <https://ubi.academia.edu/imedbeghoura>

- [14] **Anissa BESSA. BADREDDINE.** Étude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers, Thèse de DOCTORAT, spécialité Génie Civil, université de Cergy-Pontoise, (2004).
- [15] **Hermann, Kurt.** Bulletin du ciment, les ajouts : les fillers, 2 – 6, (2017).
- [16] **Sophie HUSSON.** Etude physico-chimique et mécaniques des interactions ciment-fillers, Thèse de DOCTORAT, spécialité génie des procédés, école national supérieur des mines de SAINT-ETIENNE, (1991).
- [17] **S. Caré, R. Linder, V. Baroghel-Bouny, F. de Larred, Y. Charonnat.** Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage des bétons plan d'expérience et analyse statistique, (Février 2000),
- [18] <http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbricontact&pag=Contact19&art=262>
- [19] **Paco Diederich.** Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton. Thèse de DOCTORAT, spécialité Génie civil, université de TOULOUSE, (2010).
- [20] **Jean FESTA, Georges DREUX.** Nouveau guide du béton et de ses constituants. 205 – 285, (1998).
- [21] **H. Renaud et F. Letertre.** Ouvrage en béton armé, pp. 25 - 34. 1978.
- [22] <http://www.wikip.fr/essais-mateacuteriaux-granulaires/essai-los-angeles>
- [23] **K. Mechabek et S. KHattab.** Etude expérimentale du comportement mécanique d'un béton à hautes performances avec l'ajout de la fumée de silice, spécialité Génie Civil, université de IBN khaldoun de Tiaret, 2014.
- [24] **Ait Amer Meziane Sylia,** « étude de comportement mécanique d'un BHP à base des fillers calcaires », Université Ibn KHaldoun de Tiaret, 2015/2016.
- [25] **L. Baghdadi et A. Saadaoui.** Etude expérimentale du comportement mécanique d'un béton à hautes performances à base des Laitiers de haut fourneau, spécialité Génie Civil, université de IBN khaldoun Tiaret, 2015/2016.