

N° d'ordre : 08/2002-M/G.C

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumedienne
Faculté de Génie-Civil



Thèse

Présentée Par :

Mme **BOULMELH Née CHILLALI Malika**

En Vue d'Obtention du Diplôme de Magister

Spécialité : Construction

Thème

**FORMULATION ET PROPRIETES D'UN
BETON A HAUTES PERFORMANCES A
PARTIR DE MATERIAUX LOCAUX**

Soutenue Publiquement le24/06/2002.....

Devant le Jury Composé de :

Mme F. KHARCHI	Maître de Conférence, U.S.T.H.B	Président :
M. CHEMROUK	Maître de Conférence, U.S.T.H.B	Directeur de Thèse :
Mr AHMED BEN YAHIA	Maître de Conférence, U.S.T.H.B	Examineur
Mr S. KENNAI	Maître de Conférence, U.BLIDA	Examineur
Mr M.N OUDJIT	Chargé de Cours, U.S.T.H.B	Examineur
Mr M. HAMRAT	Chargé de Cours, C.U MASCARA	Examineur

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse Monsieur M. CHEMROUK maître de conférence à L'USTHB, pour son aide, ses conseils et ses orientations tout au long de la réalisation de ce travail.

Je remercie vivement Madame F. KHARCHI, maître de conférence à L'USTHB qui me fait le grand honneur d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Mes sincères remerciements s'adressent à Monsieur A. BENYAHIA, maître de conférence à L'USTHB, Monsieur S. KENNAI, maître de conférence à l'Université de BLIDA qui ont bien voulu faire partie du jury et enrichir ce travail avec leur contribution

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur M.N. OUDJIT chargé de cours à L'USTHB et Monsieur M. HAMRAT, chargé de cours à l'Université de MASCARA qui ont bien voulu faire partie du jury.

Je remercie toute l'équipe du Laboratoire Nationale de l'Habitat et de la Construction (LNHC Oued Smar) et en particulier le directeur Monsieur KELANEMEUR, et tous les techniciens du Laboratoire béton qui n'ont pas hésité d'apporter leur précieuse aide.

Je remercie également tous les travailleurs du Laboratoire d'Analyse de la Cimenterie de Meftah ainsi que le chef de Laboratoire de Contrôle de la SAPTA (Reghaia), pour leur aide précieuse.

Enfin, que toute personne qui a contribué de près où de loin à la mise au point de ce travail trouve ici ma profonde gratitude.

SOMMAIRE

Introduction	1
But de la recherche	3
Plan de travail	4

Première partie : synthèse bibliographique

Chapitre 1 : Les constituants des BHP : rôles et dosages

1- Le ciment.....	5
2- l'eau	7
3- Les granulats	9
3-1. Les granulats fins : le sable	9
3-2. Les gros granulats	10
3-2-1 Propretés des gros granulats	10
3-2-2 Diamètre maximal des granulats	11
3-2-3 La forme des grains du granulat	11
3-2-4 La résistance des l'interface pâte-granulat	12
3-2-5 L'effet du module d'élasticité.....	13
4- Les superplastifiants	13
5- Les Ultrafines	16
5-1. Les Fillers Calcaires.....	17
5-2. Les Cendres Volantes	17
5-3. Laitiers de Haut Fourneau	18
5-4. Les Fumées de Silice.....	18

Chapitre 2 : Composition d'un béton à hautes performances

1- Introduction.....	19
2- Proportions des matériaux.....	19
2-1. Squelette granulaire.....	19
2-2. Détermination des Dosages.....	20
2-2-1 Dosage en fluidifiant	20
2-2-2. Dosage en eau	21
3- Composition types de béton à HP et THP	21
4- Cure du béton	24

Chapitre 3 : Les propriétés constructives des bétons à hautes performances

1- Propriétés du béton à l'état Frais	26
1-1. Maniabilité	26
1-2. Temps de prise	28
1-3 Hydratation.....	28
2- Propriétés mécaniques des bétons à l'état durci	30
2-1. Résistance à la compression.....	30
2-2. Résistance à la traction.....	33
2-3. Relation Contrainte-déformation	37
2-4 Module d'élasticité.....	39
2-5. Coefficient de Poisson	43

Chapitre 4 : Durabilité des bétons à hautes performances

1- Introduction.....	44
2- Perméabilité et Porosité	44
3- La résistance au gel-dégel	46
4- Comportement vis à vis des agressions chimiques	47
4-1. Réaction Alkali granulat.....	47
4-2. L'action de l'environnement salin.....	47
4-3. Carbonatation- Corrosion des aciers	48
4-4 Pénétration des ions sulfates	50
5- Résistance au feu.....	51
6- Résistance à l'abrasion.....	53

Deuxième Partie : Etude expérimentale

Chapitre 5 : Formulation du BHP

1- Introduction.....	54
2- Choix des matériaux.....	54
2-1. Le ciment.....	54
2-2. Eau de gâchage.....	55
2-3. Les granulats.....	55
2-3-1. Le sable.....	55
2-3-2. Graviers.....	56

2-3-3 Analyse granulométrique.....	57
2-4. Superplastifiants.....	59
3- Optimisation du squelette granulaire.....	60
4- Détermination du dosage en superplastifiants.....	64
4-1. Choix des fluidifiants.....	65
4-2. Estimation du dosage en fluidifiants.....	66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau N°	Titre	Page
1-1	Différents ciments utilisés dans les BHP	6
1-2	Evolution de la résistance en fonction de E/C.....	8
1-3	Résistance à la compression en fonction de la raideur des granulats	13
1-4	Classification des superplastifiants.....	15
2-1	Composition du béton utilisé lors de la construction de l'édifice River plaza, chicago.....	22
2-2	Composition du béton utilisé lors de la construction de Nova Scottia Plaza, Toronto.....	22
2-3	Yaya Diatta-université de sherbrooke.....	23
2-4	Laurentienne, montréal.....	23
2-5	Two square, Seattle (États-Unis)	24
3-1	Influence du rapport (E/C) et le dosage en C3A sur maniabilité des bétons avec et sans fumée de silice.....	27
3-2	Variation de la résistance à la compression avec l'âge.....	31
3-3	Résistances sur cubes et sur cylindres.....	32
3-4	Résistances moyennes à la compression obtenues pour différents surfaçages..33	
3-5	Résistances mécaniques de mortiers comprenant différents volumes de pâtes.33	
3-6	Formules de prévisions du module d'élasticité selon 3 règlements étrangers.....	40
3-7	Augmentation du module d'élasticité en fonction du raidissement	41
3-8	Caractéristiques mécaniques du béton en fonction du dosage en ciment.....	41
4-1	Épaisseur minimales d'enrobage des . armatures à respecter, en fonction des conditions d'exposition selon le BAEL 91.....	49
4-2	Exigences relatives au béton exposé aux attaques des sulfates.....	50
4-3	Résistances en compression pour mortier exposés à de très hautes températures.....	51
5-1	Caractéristiques du ciment... ..	55
5-2	Analyse de la propreté.....	56
5-3	Analyse granulométrique des granulats.....	58

5-4	Caractéristiques des superplastifiants.....	60
5-5	Composition du béton à granulométrie continue par la méthode Dreux Gorisse.....	61
5-6	Composition du béton à granulométrie discontinue par la méthode Dreux Gorisse.....	61
5-7	Mesure de maniabilité pour optimisation du squelette granulaire par la méthode expérimentale.....	63
5-8	Composition adoptée.....	64
5-9	Formule du BHP à granulométrie discontinue	64
5-10	Optimisation en superplastifiant.....	65
5-11	Formule du BHP à granulométrie continue.....	67
5-12	Formule du BHP à granulométrie discontinue	68
7-1	Composition du béton frais.....	77
7-2	Maintien de l'ouvrabilité dans le temps	78
7-3	Résistances moyennes en compression du BHP (E/C=0.35) à différents âges.....	82
7-4	Résistances moyennes à la compression pour différents E/C.....	82
7-5	Résistance moyennes en compression du BHP (E/C=0.35) à différents âges pour éprouvettes cubiques et cylindriques.....	86
7-6	Comparaison des résistances du béton à granulométrie continue et discontinue à 28 jours en fonction de E/C.....	87
7-7	Comparaison des masses volumiques du béton à granulométrie continue et discontinue en fonction de E/C.....	89
7-8	Résistances moyennes à la traction par fendage (E/C=0.35) à différents âges.....	91
7-9	Résistances à la traction . Compression des résultats expérimentaux avec le modèle proposé par le BAEL et les modèles proposés dans les références [41] et [43].....	93
7-10	Modules d'élasticité.....	96
7-11	Module d'élasticité :comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats théoriques.....	97
7-12	Coefficient de poisson des BHP.....	100

LISTE DES FIGURES

Figure N°	Titre	Page
1-1	Evolution des résistances pour chacune des réactions d'hydratation	7
1-2	Relation entre la résistance à la compression (Q) le rapport (E/C).....	9
1-3	L'effet du type de gravier sur la résistance du béton	12
1-4	Action du plastifiant sur le ciment	14
2-1	Représentation schématique des paramètres de formulation	19
2-2	Application de la méthode Baron - Lesage pour la détermination des proportions optimales du squelette	20
2-3	Schéma du cône de Marsh	21
2-4	Essai d'écoulement au cône	21
2-5	Résistance en fonction de l'âge (Edifice River Plaza)	22
2-6	Résistance en fonction de l'âge (Nove Scittia Plaza)	22
2-7	Résistance en fonction de l'âge (Yaya Diatta)	23
2-8	Résistance en fonction de l'âge (Laurentienne)	23
2-9	Résistance en fonction de l'âge (Two Union Square)	24
3-1	Montée en résistance des BO et des BHP.....	31
3-2	Résistance caractéristique en traction.....	35
3-3	Résistance à la traction en fonction de la résistance en compression	37
3-4	Courbes contraintes déformations (a) et (b)	38
3-5	Diagramme contrainte déformation	39
3-6	Diagramme contrainte déformation	39
3-7	Module élastique en fonction de la résistance en compression	42
4-1	Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau et le rapport E/C	46
4-2	Résistance en compression en fonction de la température.....	52
5-1	Essai de Los Angeles.....	56
5-2	Tamisage et lavage des granulats.....	57
5-3	Analyse granulométrique sable et granulats (3/8 et 8/15).....	58
5-4	Optimisation du rapport S/ (G+g).....	63
6-1	Opération de malaxage.....	69
6-2	Essai au cône d'Abrams.....	70

6-3	Arasement des éprouvettes.....	71
6-4	Conservation des éprouvettes dans l'eau.....	72
6-5	Surfaçage des éprouvettes... ..	73
6-6	Essai d'écrasement.....	74
6-7	Essai de traction par fendage.....	75
6-8	Mesure du module d'élasticité.....	75
6-9	Mesure du coefficient de poisson.....	76
7-1	Maniabilité en fonction de E/C après malaxage	79
7-2	Maniabilité en fonction de E/C 15mn après malaxage	79
7-3	Maniabilité en fonction de E/C 30mn après malaxage.....	80
7-4	Maniabilité en fonction de E/C 60mn après malaxage.....	80
7-5	Affaissement en fonction du temps pour E/C=0,35.....	81
7-6	Résistance à la compression en fonction de l'âge (E/0=0,35).....	83
7-7	Résistance en fonction de E/C.....	83
7-8	Comparaison entre les résistances des éprouvettes cubiques et cylindriques en fonction de l'âge (E/C=0,35).....	86
7-9	Comparaison des résistances du béton à granulométrie continue et discontinue en fonction de E/C.....	88
7-10	Evolution de la masse volumique en fonction de E/C.....	89
7-11	Différences des résistances en fonction de E/C.....	90
7-12	Différences des masses volumiques en fonction de E/C.....	91
7-13	f_{ij}/f_{cj} en fonction de l'âge pour E/C=0,35.....	92
7-14	Résistances à la traction. Comparaison des résultats expérimentaux avec le modèle BAEL et les modèles proposées dans les références [43] et [41]	93
7-15	(a) Courbe contrainte- déformation (granulométrie continue).....	95
7-15	(b) Courbe contrainte- déformation (granulométrie discontinue)	95
7-16	(a) Courbe contrainte- déformation. Comparaison des résultats expérimentaux avec la formule théorique proposée dans la référence [53] (granulométrie continue).98	

7-16 (b) Courbe contrainte- déformation. Comparaison des résultats expérimentaux avec la formule théorique proposée dans la référence [53] (granulométrie discontinue)	99
7-17 Coefficient de poisson en fonction de E/C	101
7-18 Résistances à la compression en fonction des coefficients de poisson pour Différents E/C.....	101

LISTE D'ABREVIATIONS ET SYMBOLES

ACI	: American concrete institue
ACNOR	: Association canadienne de normalisation
AFNOR	: Association française de normalisation
BAEL	: Béton armé aux états limites
BO	: Béton ordinaire
BHP	: Béton à hautes performances
BHTP	: Béton à très hautes performances
BPEL	: Béton précontraint aux états limites
C3A	: Aluminate tricalcique
CPA	: Ciment portland artificielle
CPJ	: Ciment portland composé
E/C	: Rapport Eau / Ciment
E_c	: Module d'élasticité
E/L (WB)	: Rapport Eau / Liant (Water / Binder ratio)
f_{c28}	: Résistance caractéristique à la compression du béton âgé de 28 jours
f_r	: Résistance à la traction par flexion
f_t	: Résistance à la traction par fendage
FS	: Fumée de silice
NT	: Module de finesse
SP	: Superplastifiant
σ - ϵ	: Contrainte - déformation
ν	: coefficient de poisson;

RESUME

Le présent travail consiste à étudier les ingrédients du mélange pour pouvoir confectionner un béton de hautes performances ; ces ingrédients du mélange sont des matériaux localement disponibles pour nos chantiers.

Les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques du béton confectionné ont été étudiées aussi bien à travers la littérature revue dans ce travail qu'en se basant sur les résultats de l'expérimentation entreprise. La présente étude a montré qu'un béton de 60MPa de résistance à la compression à 28 jours peut être confectionné avec aisance et mis en place dans des moules pour obtenir des structures de constructions performantes après durcissement. A long terme, les structures auront une durabilité meilleure que celle faite d'un béton ordinaire (de l'ordre 20-25 MPa).

Les performances semblent être d'autant meilleures pour une granulométrie discontinue. Cependant, la nature du ciment algérien avec un fort taux en Aluminate tricalcique (C_3A) ajoutée à la qualité des granulats (formes allongées et irrégulières) semblent limiter d'abord les qualités rhéologiques malgré l'utilisation des fluidifiants de Granitex, et par la suite après durcissement les qualités physico-mécaniques. Ceci explique la perte de maniabilité après 15mn pour les mélanges avec des E/C de 0,25 et l'impossibilité d'atteindre des résistances élevées telles atteintes dans d'autres travaux (dépassant 80MPa) pour des proportions de mélange similaires.

D'une manière générale, le comportement du BHP confectionné dans ce travail (60MPa) semble concorder avec la littérature spécifique à ce thème.

SYNOPSIS

The present work consists of studying the mixing ingredients for producing high performance concrete ; these mixing ingredients are locally available materials for our construction sites.

The rheological and physico- mechanical properties of the produced concrete have been studied through the reviewed literature and using the experimental results of this work. The present study has shown that it is possible to produce with ease a concrete having 60 MPa compressive strength at 28 days of age and to pour it in the shaft in order to obtain highly performing construction structures after drying.

The performances seem to be even better for a discontinuous grading. However, the nature of the Algerian cement with a high proportion of Tricalcium Aluminate (C_3A) added to the quality of aggregates (elongated and irregular shapes) seem to limit first of all the rheological qualities despite the use of the fluidifying materials from Granitex and alter drying the physico-mechanical properties. This explains the loss of workability after 15mm from mixing for concrete having E/C of 0,25 and the impossibility of achieving higher strengths such as obtained elsewhere (in excess of 80MPa) for similar mixing proportions.

Generally, the behaviour of the high performance concrete produced in this work (60MPa) seems to agree with what is reported in the relevant literature.

INTRODUCTION

Le béton, matériau de base le plus traditionnel du génie-civil, ne pouvait pas échapper, malgré un temps de retard, au formidable mouvement d'évolution technologique et scientifique de ces dernières années. C'est le matériau, le plus couramment utilisé dans l'industrie de la construction.

Ce sont surtout les récentes avancées technologiques dans le domaine de la dispersion des grains de ciment à l'aide de molécules organiques de synthèse fort complexe plus connues dans la technologie du béton sous le nom de «SUPERPLASTIFIANT » (appelés encore fluidifiant) qui ont permis d'atteindre de telles performances.

La technologie des bétons à haute résistance s'est surtout développée en Amérique du Nord autour de Chicago à partir des années 1960. En fait, le béton le plus résistant, utilisé au cours des années 50 dans la région de Chicago était un béton de 35 MPa. L'historique de l'évolution de ce béton peut se résumer comme suit

En 1962, un béton de 40 MPa est mis en place lors de la construction de L'édifice 1000 lake shore plaza aux Etats Unis.

En 1965, c'est un béton de 50 MPa qui est coulé lors de la construction de l'édifice lake point à Chicago.

En 1972, la résistance à la compression du béton atteint 60 MPa lors de la construction du Mid Continental Plaza Building à Chicago.

En 1976, un béton de 75 MPa est utilisé pour construire 2 colonnes instrumentées dans le River Plaza Projet aux Etats Unis.

En 1986, un béton de 80 MPa est coulé lors de la construction de L'édifice abritant la banque Nouvelle Ecosse à Toronto au Canada.

En 1987 - 1988, le béton livré pour la construction de Scotia Plaza à Toronto avait une résistance moyenne de 93,4 MPa à 90 jours.

Les années 1980 ont vu la naissance des bétons à hautes performances (BHP) produites industriellement avec des résistances en compression atteignant ou dépassant 60 MPa. Ces bétons, dont l'usage se généralise aujourd'hui pour des structures importantes, présentent également des propriétés de durabilité améliorées par rapport aux bétons ordinaires (BO).

En France, des BHP de 50 à 80 MPa de résistance à la compression ont déjà été mis en oeuvre [1]. Ainsi, le pont de Joigny conçu et construit en 1989 utilise un béton de 60 MPa de résistance caractéristique sans fumée de silice. Les ponts de l'île de Ré et de Pertuiset ont été réalisés en BHP avec fumée de silice, de même que les mégapoutres de l'Arche de la Défense à Paris [1].

Durant les dernières décennies, les chercheurs ont élaboré plusieurs travaux scientifiques, dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives du béton frais et durci. En réalité le béton n'est pas un matériau inerte et indestructible ; mais il est un matériau évolutif qui résistera à l'épreuve du temps, plus ou moins longtemps, et selon

les conditions environnementales auxquelles il est soumis.

Quant à la vulnérabilité du béton à la pénétration des agents agressifs, elle est en relation directe avec sa porosité ; il est donc nécessaire d'explorer des voies visant à optimiser cette porosité, afin d'offrir au béton une meilleure performance à long terme. Ceci passe nécessairement par la réduction de la quantité d'eau du mélange en utilisant un superplastifiant pour compenser la perte de maniabilité. L'idéal étant de n'utiliser que la quantité d'eau strictement nécessaire à l'hydratation.

Par béton à haute performance (BHP) on vise donc à obtenir un béton ayant les qualités suivantes

1. Une rhéologie satisfaisante, afin de faciliter sa mise en oeuvre et réduire sa ségrégation qui résulterait d'un excès de compactage.
2. Une résistance élevée dès le jeune âge.
3. Une amélioration de la durabilité des ouvrages, par l'augmentation de la compacité du béton (faible discontinuité de la porosité capillaire), ce qui entraîne la réduction de la perméabilité aux agents agressifs.
4. Grâce à sa haute résistance mécanique, un béton à hautes performances permet la réalisation de structures avec des sections inférieures à celles prévues par les bétons ordinaires, d'où le gain économique.

Objectif de l'étude.

La mise au point de la formulation d'un béton à hautes performances est une tâche délicate et complexe à la fois. En effet, il s'agit de combiner les différents ingrédients du béton pour obtenir la résistance à la compression désirée (60MPa et plus) tout en s'assurant que ce béton de très faible rapport Eau /Ciment demeurera suffisamment maniable jusqu'à sa mise en place.

L'objectif de ce travail consiste donc en l'élaboration d'un béton à hautes performances à partir des matériaux localement disponibles, et l'étude expérimentale des propriétés importantes de ce matériau obtenu.

Cette recherche mettrait en évidence les possibilités d'amélioration des qualités du béton dans les chantiers algériens et donc les possibilités d'une économie en matériau au moment où le domaine de la construction connaît un manque d'approvisionnement en agrégat et ciment.

Plan de Travail

Le présent travail est composé de deux parties

- Une partie théorique qui consiste en une synthèse bibliographique où nous présentons les caractéristiques des constituants des bétons à hautes performances, ensuite, nous exposons une méthode de formulation d'un BHP ainsi que ses différentes propriétés physico-mécaniques et en dernier lieu, on a fait une synthèse sur sa durabilité.
- Une partie expérimentale où nous décrivons la démarche suivie pour la formulation des bétons ainsi que le programme des essais à effectuer. Puis nous présentons et interprétons les résultats obtenus.

Enfm, nous fmirons notre travail par une conclusion générale et des recommandations futures.

CHAPITRE 1

LES CONSTITUANTS DES BHP : ROLES ET DOSAGES

Traditionnellement, les bétons sont confectionnés au départ de granulats, de sable, de ciment et d'eau. Cependant, en plus de ces quatre composants fondamentaux, les bétons de nos jours peuvent contenir des superplastifiants et des ultrafines. Ce sont les bétons à haute performance qui contiennent moins d'eau et donc présentent des rapports Eau / Ciment relativement faibles (inférieur à 0,4).

1- Le ciment.

Le ciment est une poudre minérale qui résulte du broyage du clinker, roche artificielle obtenue par cuisson à haute température (1500°C) d'un mélange de calcaire (#80 %) et d'argile (#20%) comprenant principalement de la chaux, de la silice et de l'alumine. Mélangée avec de l'eau, la poudre de ciment forme une pâte onctueuse qui se solidifie en dégageant de la chaleur lors de l'hydratation ou prise du ciment, qui sera suivie par son durcissement progressif [1].

On distingue plusieurs catégories de ciments en fonction de leur composition. Ils sont aussi caractérisés par leur classe de résistance et leur temps de début de prise. Les ciments utilisés dans les BHP sont choisis dans la gamme proposée par les cimentiers pour la confection des bétons classiques. On ne peut malheureusement pas fabriquer un BHP avec n'importe quel ciment. Cependant, l'expérience montre que dans une région donnée, il y a toujours un ciment qui est meilleur que les autres, c'est à dire un ciment avec lequel il est plus facile d'obtenir à la fois une bonne maniabilité et une haute résistance [1].

Au Québec, il a été montré que les ciments les plus performants pour avoir de tels bétons sont des ciments de type 10 et 30 (voir tableau 1-1) fabriqués par les cimenteries locales [2]. En effet le type 30 peut s'avérer plus intéressant à cause de sa haute résistance initiale [2].

Désignation Américaine	Désignation canadienne	
Type I	Type 10	Ciment portland ordinaire.
Type II	Type 20	Ciment portland ordinaire à la chaleur d'hydratation et modérées résistance aux sulfates
Type III	Type 30	Ciment portland à durcissement rapide.
Type IV	Type 40	Ciment portland à faible chaleur
Type V	Type 50	Ciment portland résistant aux sulfates.

Tableau 1-1 : Différents Ciments Utilisés dans les BHP [3].

Chimiquement les CPA (ciments portland artificiels) comportent quatre principaux constituants: les silicates bi-calciques (C2S :20%), les silicates tri-calciques (C3S :60%), les aluminates tricalciques (C3A : 10%), et les ferro-aluminates tetracalciques (C4AF :10%) [4].

Le C3A s'hydrate en premier, puis du C3S qui conduit aux meilleures résistances, enfin les C2S et C4AF. Les C3A permettent d'obtenir des résistances intéressantes au très jeune âge, mais peuvent aussi présenter l'inconvénient de modifier le comportement rhéologique du béton frais en présence d'adjuvants [4].

Torrenti [5] rapporte aussi que les ciments ayant le plus grand pourcentage de C3S et C2S donnent la plus grande résistance du béton (fig. 1-1).

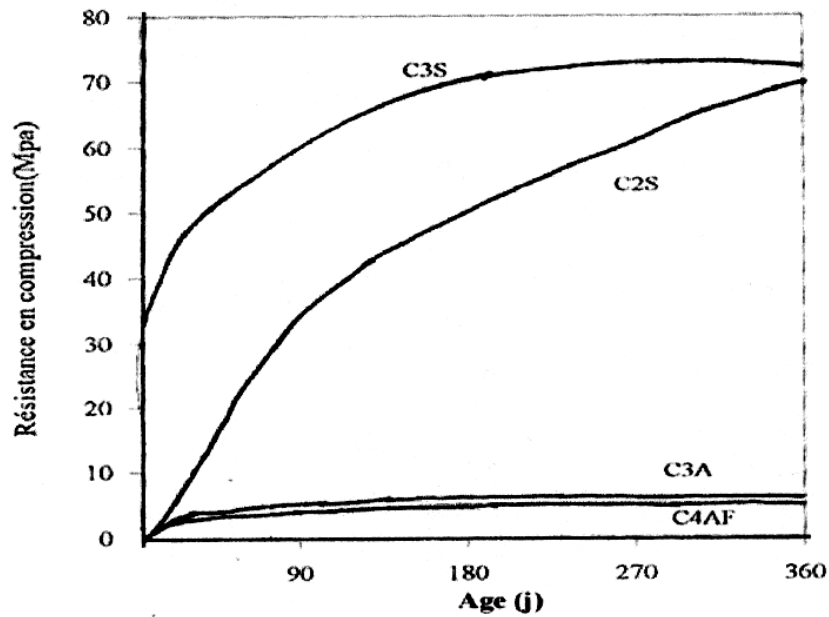


Fig.(1-1): Evolution des résistances pour chacune des réactions d'hydratation [5]

En pratique, on est toujours obligé de faire des essais de vérifications sur mortiers et coulis en laboratoire pour sélectionner le meilleur ciment.

Paillere, Serrano et Grimaldi [6] dans leurs études sur l'influence du dosage de superplastifiant sur la maniabilité du béton fabriqué avec différents types de ciment ont constaté que le ciment ayant le plus faible pourcentage d'aluminate tricalcique ($C_3A < 8\%$) donne la meilleure maniabilité.

Concernant la quantité de ciment à utiliser dans le mélange, des recherches [4] [7] [8] ont montré que son dosage peut varier entre 400 et 550 kg/m³, au delà, le problème du retrait devient sérieux. En revanche, d'autres travaux publiés [9] relatent l'existence d'un dosage optimum pour des considérations économiques. Cet optimum peut varier d'un pays à l'autre selon le coût de l'industrie du ciment.

2- L'eau

Le principe est d'en diminuer sa quantité, mais sa nature est identique à celle utilisée pour les bétons courants. Elle doit être propre, dépourvue de sels.

Toute eau douteuse doit être analysée avant son emploi. L'eau utilisée dans le mélange se compose en deux parties :

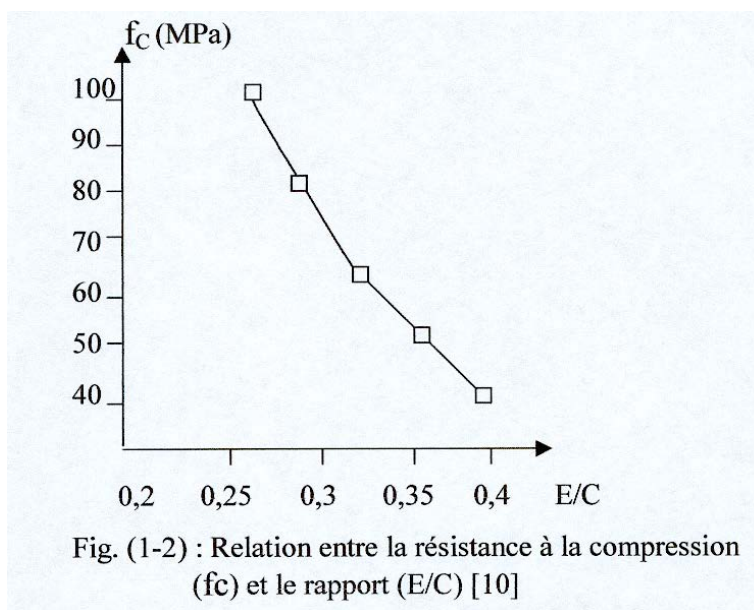
-Une partie de cette eau de gâchage sera fixée par les éléments anhydres du ciment et entrera dans le processus d'hydratation; cette eau qui ne dépasse pas les 30% de la quantité totale d'eau du mélange est donc indispensable au processus du durcissement du béton. Cette eau a donc un rôle physico-chimique dans le mélange béton

- Une seconde partie appelée eau libre, remplit les vides du mélange et sert à plastifier le béton pour pouvoir être mis en place correctement dans les moules et coffrages. Cette eau qui n'est pas combinée chimiquement s'évapore avec le temps. Une maturation adéquate retarde son départ et favorise les conditions d'hydratation du ciment. Les vides laissés après le départ de cette eau nuisent au béton durci en favorisant la perméabilité et donc l'accès de corps étrangers nuisibles au matériau béton.

L'objectif est donc de diminuer cette quantité d'eau libre pour fabriquer les BHP. La maniabilité du béton frais assurée par cette eau libre doit alors être assurée par d'autres produits (les superplastifiants). Un béton ordinaire a un rapport E/C qui varie entre 0,5 et 0,7 pendant que celui d'un BHP est inférieur à 0,4. Actuellement, dans les pays développés ce rapport est descendu à bien au dessous de 0,3 (voir tableau 1-2)

Résistance spécifiée (MPa)	E/C Maximum
41,4	0,4
55,2	0,36
62,1	0,34
69	0,32
82,8	0,30
96,6	0,28

Tableau 1-2: Evolution de la résistance avec E/C [10].



Le tableau 1-2 et la figure 1-2 expriment clairement l'évolution rapide de la résistance à la compression du béton quand le rapport E/C est réduit d'avantage.,

3- Les Granulats

C'est le constituant inerte du béton, le moins cher, peut être le moins noble, mais il occupe cependant environ 70 % du volume du matériau et influe directement sur ses propriétés.

Les granulats utilisés pour les bétons à hautes performances ne diffèrent pas en nature mais nécessitent une sélection par rapport à ceux utilisés pour le béton ordinaire.

Deux propriétés sont essentielles pour ces agrégats afin qu'ils résultent en un BHP ; se sont la dureté et l'adhérence.

3-1 Granulats fins : Sable

Peu de recherches ont été faites dans ce domaine. On recommande souvent que le sable utilisé pour les BHP ait un module de finesse (MF) élevé de 3 à 3,2 et donc un sable Grossier. La surface spécifique s'en trouvera ainsi réduite ce qui réduira la quantité d'eau de gâchage et par suite le rapport E /C. Cette quantité d'eau de gâchage est encore réduit avec des formes arrondies ou cubiques avec très peu de particules de formes plates et irrégulières.

Un sable grossier n'apporte pas beaucoup d'éléments fins dans le mélange [11] vu que celui-ci est suffisamment riche en particules fines puisqu'il contient en général 450 à 550 kg de ciment et d'ajout minéral par mètre cube.

Avec un module de finesse élevé, le béton frais est peu collant et on obtient une meilleure ouvrabilité et de meilleures résistances en compression simple.

Des études ont montré qu'un sable ayant un module de finesse inférieur à 2,5 rendait le béton collant, difficile à compacter et donnerait des résistances moins bonnes [11].

Bedard [2] a obtenu d'excellents résultats à l'université de Sherbrooke en mélangeant à part égale un sable siliceux naturel grossier et un sable broyé provenant de la même roche que celle qu'il utilisait comme granulat. Enfin, il est à noter, qu'il est préférable d'utiliser des sables de rivière très durs.

3-2 Gros Granulats

Le gros-granat idéal pour un béton à hautes performances doit être résistant à l'écrasement, avoir un module d'élasticité aussi voisin que possible de celui du mortier de façon à minimiser les déformations au niveau de l'interface Granulat/Mortier.

En effet, toute différence sensible de déformabilité entre ces deux constituants essentiels du béton pourrait constituer une source de contraintes locales capables de faire décoller le gros granulat et la pâte du ciment hydratée [12].

Cependant, il faut porter une attention plus particulière au choix de la dimension, de la forme, de la texture et de la propreté des granulats. Pour pouvoir confectionner un béton hautement performant.

3-2-1 Propreté des gros- granulats.

Les gros-granulats entrant dans la fabrication d'un BHP doivent être propres, c'est à dire qu'ils ne doivent pas être recouverts de poussières ou d'argile.

La présence de poussière à la surface des gros-granulats peut en effet augmenter la quantité de fines particules présentes dans le mélange et par conséquent augmenter la

demande en eau. Elle peut aussi affecter la qualité de l'adhérence pâte de ciment-granulat. La présence d'argile dans les granulats, quant à elle, risque d'affecter la qualité du béton à travers son cycle de séchage et de mouillage. D'une manière générale la texture rugueuse des agrégats concassés permet une meilleure adhérence entre les particules d'agrégats et la pâte de ciment durci pourvu que les surfaces de contacts sont propres.

3-2-2 Dimensions maximales des granulats

Plusieurs études [12] [7] [13] ont montrés que ce sont les gros-granulats de diamètre maximum compris entre 10=14 mm qui fournissent les meilleurs résistances. En béton ordinaire, cette dimension peut aller jusqu'à 20-25mm. Des dimensions aussi importantes créent des concentrations de contraintes à l'interface pâte de ciment-granulat et détruisent l'adhérence entre les deux composantes.

A des niveaux élevés de résistance, la taille maximale est donc nuisible à la qualité du béton. Cette taille maximale peut aussi poinçonner la pâte de ciment et donc aboutir à des résistances moins bonnes. Cependant, diminuer d'avantage la taille maximale des granulats demanderait plus d'eau au mélange et entraînerait une porosité dans le mélange durci.

3-2-3 La forme des grains du granulat

Dans les bétons à hautes performances, la forme qui donne de meilleures performances semble être la forme cubique [15]. Elle demande moins d'eau et facilite la mise en oeuvre du béton, contrairement aux particules plates, allongées et à grande angularité en paillettes où en aiguilles. Des essais établis par De Larrard [4] ont montré que la résistance des bétons à très hautes performances (BTHP) est fonction de la forme et des raideurs des granulats.

D'après De Larrard [4], les granulats idéals pour un BHP, doivent être de forme régulière, idéalement sphérique ou cubique, propres de toute trace de poussière et surtout de haute résistance.

3-2-4 La résistance de l'interface pâte - granulat.

Les caractéristiques de l'interface pâte de ciment- granulat sont apparemment liées aux caractéristiques mécaniques et physiques des composants du béton et plus où moins aux produits des réactions chimiques qui ont lieu entre le ciment et les agrégats qui remplissent l'interface. En outre, l'influence de l'adhérence à l'interface pâte-granulat sur la résistance en compression n'est pas facile à quantifier, du fait qu'il est difficile de faire varier ce paramètre en gardant les autres constants (forme, granularité,...).

Il est à noter qu'une bonne adhérence améliore la résistance et notamment celle en traction [13].

Les résultats expérimentaux montrent que la résistance d'un béton fabriqué avec des agrégats concassés est plus grande que celle du même béton fabriqué avec des agrégats roulés. Cela est dû au chevauchement des granulats concassés qui limite leur mouvement dans le squelette solide. Cet effet est prononcé pour un faible rapport E/C et peut être négligé dans un béton de faible résistance [14] (voir fig :1-3)

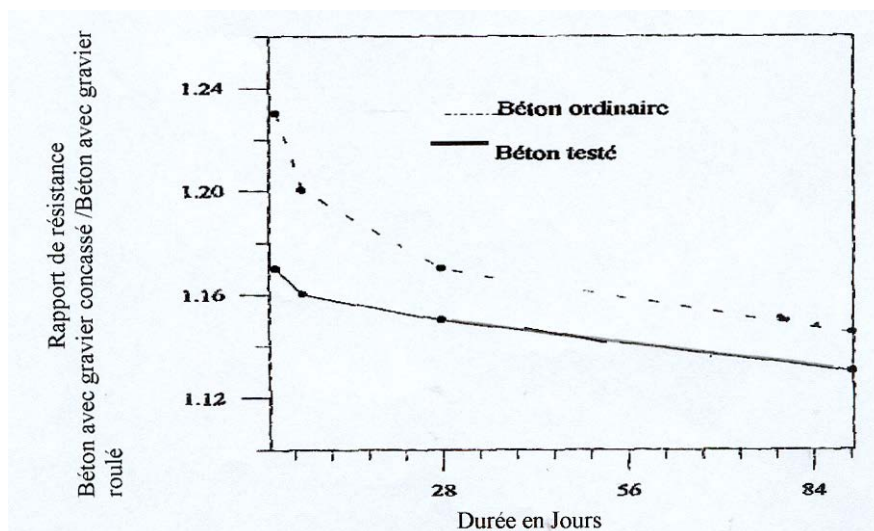


Fig : 1-3 L'effet du type de gravier sur la résistance du béton [14]

3-2-5 module d'élasticité du gros-granulat.

Le module d'élasticité des gros-granulats constitue un des facteurs déterminant de la résistance du béton. Généralement la résistance du béton augmente avec l'augmentation du module d'élasticité des gros-granulats.

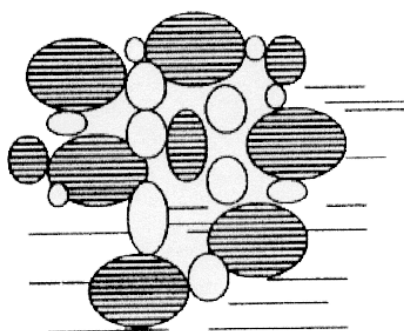
Bedard et Al [17] ont trouvé qu'il existe une certaine concomitance entre la raideur des granulats et la résistance à la compression (Tableau 1-3).

Roche	A	B	C	D	E	F	G	H
Module D'young (Gpa)	41	62	64	66	68	76	78	80
Résistance à la compression (M a)	108	195	137	131	113	245	228	290

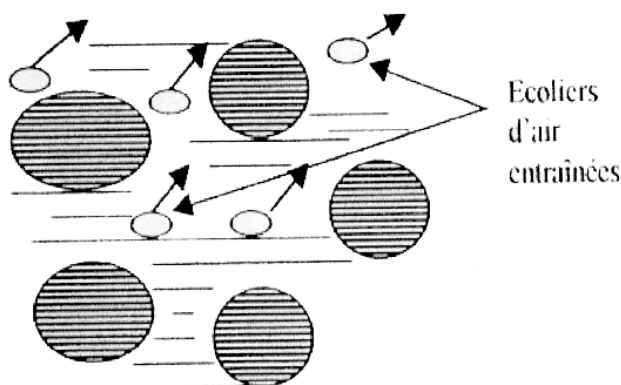
Tableau (1.3) résistance à la compression en fonction de la raideur des granulats [17].

4-Les Superplastifiants

La nouveauté essentielle apparue dans la technologie des bétons dans les années 80 réside en l'utilisation de fluidifiants appelés superplastifiants. Ce sont des résines de synthèse (tableaul-4), qui sont incorporées à faibles doses dans le mélange en cours de malaxage, et dont l'effet est de disperser et défloculer les grains de ciment et aussi réduire la quantité d'eau nécessaire à la maniabilité du béton frais (voir figure 1-4).



a) Sans plastifiant :
Colonies de grains de ciment non défloculés :
cohésion capillaire par rétention de bulles d'air



b) Avec plastifiant
Les molécules polaires -apolaires à chaîne longue apolaire tension active sont adsorbées par les grains de ciment basique : l'air ne mouillant plus ces derniers. s'élimine : d'où la défloculation capillaire facilitée par abaissement de la tension aux interfaces.

Figure 1-4 ; Action du plastifiant sur le ciment [18].

Mécanisme de la défloculation et de la séparation des colonies de grains fins

Les particules de ciment portland présentent de nombreuses charges électrostatiques sur leur surface. En présence d'eau, l'attraction de ces charges de signe contraire provoque leur réorganisation sous la forme d'une floculation.

L'action des malaxeurs et des plus gros granulats durant la fabrication du béton n'étant pas suffisante pour éviter ce phénomène. Celui-ci nécessite un rajout d'eau. Les adjuvants vont donc devoir neutraliser ce phénomène de floculation.

Ces produits chimiques conduisent jusqu'à 30% de réduction d'eau, tout en gardant au mélange une maniabilité permettant sa mise en oeuvre par les méthodes usuelles. Cette réduction conduit à une augmentation de la compacité du béton, à l'amélioration de ces résistances mécaniques et à sa durabilité à long terme [19].

Catég	Dénomination	Fabrication	Nom et forme	PH	Particularité
1	Mélatamine sulfonée formaldéhyde	Réaction résine de Mélatamine / • Sulfonation Par solution de bisulfite de sodium • Polymérisation	Solution aqueuse à 20% d'extrait sec Couleur: Laiteuse Marques : Melment-L 10 Melment-F 10 Chryso GT	8-9	• Non Entraîneur d'air • Non tensioactif.
2	Naphtalène sulfonée formaldéhyde.	Réaction naphtaline /formaldéhyde • Sulfonation Neutralisation à la soude caustique • Polymérisation.	Solution aqueuse entre 20 à 45% Couleur: brune Marques : Protex-PSP-R PSP-N Sikafluid Mighty 150	9	
3	Lignosulfonate de sodium (où calcium)	Traitement du bois par voie chimique.	Liquide couleur brun foncé Marques :plastiment BV 40.	7,5	•Tension actif • Entraîneur d'air • Retardataire
4	Autres produits Saccharates, carboxylate, esters, acide sulfoniques,..		[c]		

Tableau 1-4 Classification des superplastifiants [4]

Le problème majeur rencontré dans la formulation des BHP consiste à choisir le couple ciment- superplastifiant permettant d'obtenir une réduction maximale de l'eau, une bonne ouvrabilité et une rhéologie satisfaisante du béton pendant le temps de mise en oeuvre. En revanche, le comportement du couple ciment- superplastifiant dépend de la réactivité du ciment d'une part et l'efficacité du superplastifiant d'autre part[20].

Des résultats expérimentaux (cité en référence[21]) ont montré qu'une forte teneur en C3A contenue dans le ciment peut causer une fausse prise. En parallèle, un retard de prise est causé par une faible teneur en C3A du ciment.

D'autres études ont constaté que la présence du K20 dans le ciment provoque l'augmentation du raidissement.

Les dosages utilisés sont variables et résultent principalement d'un compromis entre l'efficacité et le coût. Paillere et Al (cité en référence [6]) ont constaté que les dosages très élevés en superplastifiants (supérieur à 3% d'extrait sec) conduisent à des raidissements rapides des bétons.

Pour sa part, Fontaine[22] a également observé que les ciments faiblement sulfatés donnent lieu à des phénomènes de prise rapide lorsque le dosage en superplastifiant est augmenté jusqu'à 3%.

En outre, les dosages en superplastifiants restent inférieurs à 4% de la masse du ciment, et dont l'effet est de défloculer les fines et ultrafines du béton frais. Ce dosage est fractionné en deux, une fraction (1/3) dans l'eau de gâchage et la fraction restante (2/3) à la fin du malaxage [6].

En Algérie [24], les superplastifiants restent encore des produits chimiques relativement inconnus dans l'industrie de la construction, bien que GRANITEX a commencé leur production depuis quelques années.

5- Les ultrafines

Les ultrafines sont des particules de très faibles dimensions qui, ajoutées en quantités de l'ordre de 10% du poids de ciment, améliorent notablement les performances du béton grâce à leurs propriétés physiques et chimiques. Ce sont des additions en général siliceuses de taille moyenne inférieure à celle du ciment, qui ont d'abord un rôle de remplissage, qu'on appelle l'effet granulaire, et qui peuvent aussi avoir un effet pouzzolanique.

Les ultrafines sont utilisés pour fabriquer des bétons nécessitant des propriétés physiques et mécaniques améliorées, en particulier une meilleure durabilité lorsqu'ils sont soumis à certains environnements particulièrement agressifs et surtout pour abaisser l'élévation de température du béton lorsque la réaction chimique se développe.

Les produits cimentaires additionnels utilisés dans les bétons à hautes et très hautes performances sont essentiellement: les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux, les fillers calcaires, les fumées de silice, et kaolinite. Ce dernier est apparu récemment, et présente une activité pouzzolanique comparable à celle des fumées de silice.

5-1 Les Fillers calcaires.

Les fillers sont des matériaux obtenus par broyage ou pulvérisation de certaines roches (le calcaire, la bentonite). Ils ont une finesse comparable à celle du ciment.

Pour les dosages utilisés, les normes Françaises permettent d'aller jusqu'à 10% dans les ciments de types CPJ (ciment portland composé qui contient au moins 65% de clinkers + des constituants secondaires) [23].

Cependant, l'utilisation des fillers calcaires permet de

- 1- Réduire le coût final unitaire du ciment en réduisant son contenu énergétique.
- 2- Augmenter la compacité de mouture des broyeurs (les fillers calcaires au clinker).
- 3- Améliorer l'ouvrabilité du béton frais tout en permettant de densifier la matrice du mortier.

5-2 Les cendres volantes.

Ce sont des fines poudres récupérées des fumées des centrales électriques fonctionnant au charbon favorable du point de vue ouvrabilité [25]. Leurs surfaces spécifiques pleines ou creuses ayant la grosseur de grains de ciment. Elles peuvent constituer 5 à 20% de la composition du CPJ.

Ces cendres volantes présentent une réaction pouzzolanique en présence de la chaux libre. Cette réaction entraîne une prise secondaire du béton ou du mortier, d'où résultent des caractéristiques favorables au niveau de la résistance et de la durabilité.

De manière moins courante, elles sont également additionnées directement au mélange de béton, où leur forme sphérique entraîne un effet favorable du point de vue ouvrabilité [25].

5-3 Laitiers de haut fourneau.

Les laitiers de haut fourneau sont des sous produits de l'industrie sidérurgique. Ils sont obtenus par trempe du liquide qui surnage sur la fonte après broyage. Leur surface spécifique est de l'ordre de 4000 à 6000 m²/g Le dosage varie jusqu'à 50% de la masse du ciment par du laitier tout en conservant la même résistance à 28 jours[23].

L'utilisation d'un laitier permet d'augmenter la compacité de la pâte hydratée. Par contre son inconvénient majeur est de diminuer de façon sensible la résistance en compression du béton à très court terme.

5-4 Les fumées de silice

Les fumées de silice, ou microsilice, sont les plus utilisés ; ce sont des oxydes de silicium à structure amorphe en forme de microsphère de diamètre de l'ordre de 0,1 micromètre (environ cent fois plus fine que le ciment), et de surface spécifique comprise entre 60000 et 240000 m²/g [13]. En outre, elles présentent une réaction pouzzolanique et remplit en même temps les pores les plus fins du béton (grâce à leur surface spécifique très élevée.).

Cependant, les dosages dépendent de la caractéristique principale qui doit être améliorée. Les dosages les plus utilisés se situent aux alentours de 10°10, pour des bétons de résistance caractéristique de l'ordre de 70-80 MPa [13].

L'ajout de microsilice dans le béton permet d'augmenter la résistance en compression, d'améliorer sensiblement la maniabilité du béton, surtout en présence d'un superplastifiant. Elle permet aussi d'améliorer la résistance aux cycles de gel-dégel [26] [23].

En conclusion , l'utilisation des ultrafines dans les bétons permet non seulement de confectionner des bétons ayant des propriétés améliorées différentes de celles des bétons ordinaires, mais aussi des bétons économiques.

CHAPITRE 2

COMPOSITION D'UN BETON A HAUTE PERFORMANCE

1- Introduction

La formulation des bétons à haute performances est une opération un peu plus complexe que celle des bétons ordinaires, car le nombre à gérer est élevé (addition des superplastifiants et ultrafines). Le point critique consiste à marier un ciment et un superplastifiant, de façon à obtenir un mélange fluide (bien que de faible teneur en eau), et ce pendant un temps suffisant pour permettre une mise en oeuvre aisée du béton.

En fait, l'ingénieur doit trouver pour chaque formulation le meilleur équilibre entre la rhéologie, la performance et le coût (fig.2-1)

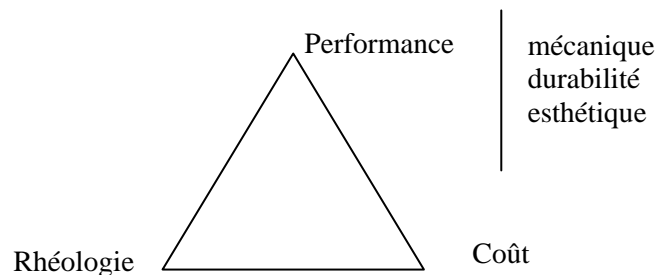


fig. 2-1 : Représentation schématique des paramètres de formulation

2- Proportions des Matériaux

2-1 Squelette Granulaire

Une méthode expérimentale de détermination des proportions optimales a été développée par Baron et Lesage [27]. Elle part de la constatation selon laquelle les proportions optimales correspondent au mélange de maniabilité maximale, pour un volume et une nature de pâte fixés.

De Larrard [4] a appliqué ce processus à un béton binaire (une classe de sable, une classe de gravillon) dont il a recherché le meilleur rapport g/s, pour des pâtes normales (ciment + eau), HP (ciment + fluidifiant + eau) puis THP (ciment + fumée de silice + fluidifiant + eau).

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (2-2)

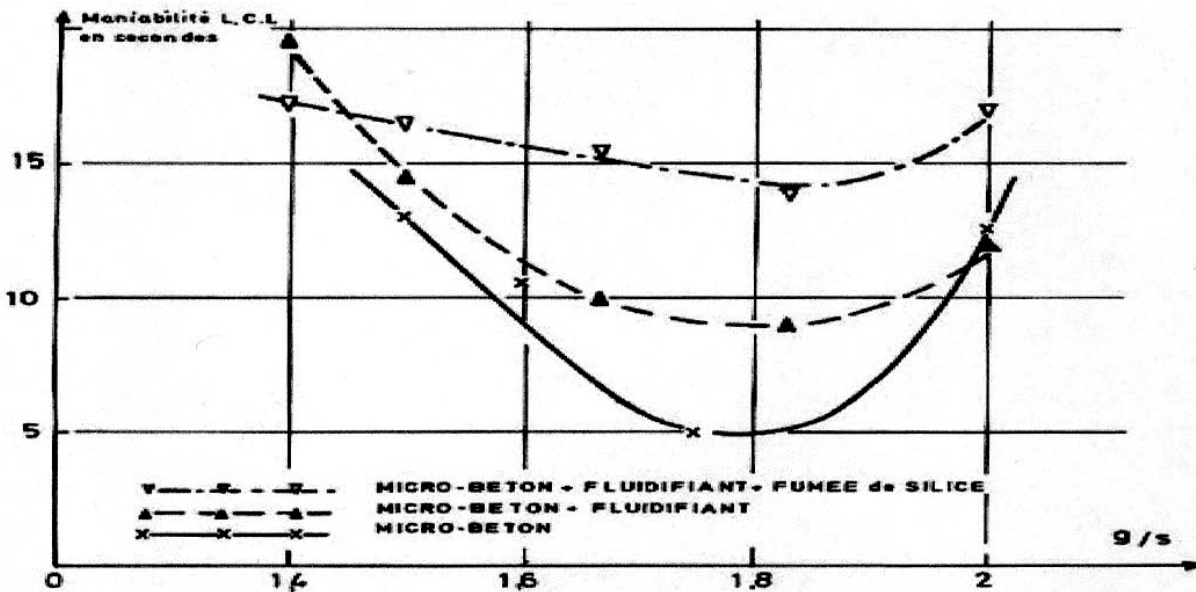


Fig 2-2 : application de la méthode Baron-Lesage pour la détermination des proportions optimales du squelette [4]

A la précision des expériences près, les rapports g/s optimums sont les mêmes pour les trois pâtes (ici g/s = 1.8). convient. Ce qui montre la validité du choix de conservation du squelette, lorsqu'on passe de la formule régionale de béton ordinaire à la nouvelle formule du BHP

2-2 Détermination des Dosages

Les dosages en adjuvants et en eau sont définis par l'essai au cône de March [4]

2-2-1 Dosage en Fluidifiant

De Larrard [4] a utilisé le cône de March (fig. 2-3), pour déterminer le dosage efficace en fluidifiant : en opérant par ajouts successifs dans une suspension. Le principe consiste à mesurer le temps d'écoulement dans un cône, entre deux repères (fig. 2-4). Le temps d'écoulement diminue puis se stabilise.

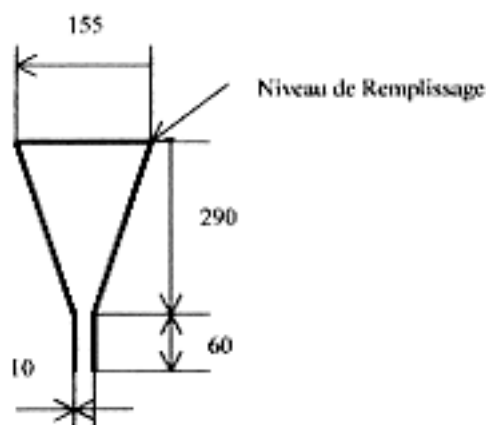


Fig 2-3 : Schéma du cône de Marsh

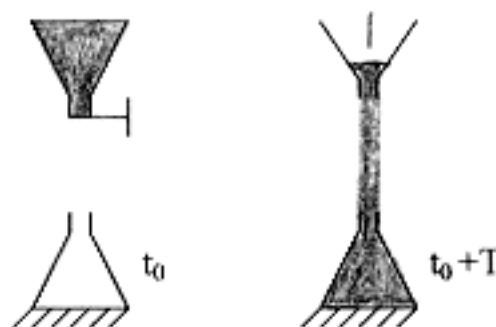


Fig 2-4 : Essai d'écoulement au cône

Cependant, la dose de saturation est obtenue par des mesures de temps d'écoulement au cône de Marsh. Cette dose de saturation est définie comme la dose au-delà de laquelle la maniabilité du mélange ne s'améliore plus. En particulier, il faut veiller à ce que l'eau totale (eau d'ajout + eau fluidifiant) demeure en quantité constante dans cette phase d'étude, faute de quoi une évolution de la maniabilité pourra être attribuée soit à l'eau, soit au fluidifiant.

2-2-2 Dosage en Eau

Les doses des fluidifiants étant fixées, il reste à déterminer le dosage en eau pour lequel il représente le même temps d'écoulement que le coulis témoin.

Enfin, après avoir sélectionné une formulation de pâte, on revient à l'échelle du béton. Le béton HP obtenu peut alors faire l'objet d'une série d'essais de caractérisation.

En conclusion la formulation d'un BHP demande l'introduction de plusieurs matériaux (composants). Seulement, il faut utiliser ces ingrédients judicieusement en respectant leurs dosages pour pouvoir palier à leurs inconvénients. En outre, nous faisons allusion spécialement aux superplastifiants et aux ultrafins, grâce auxquels la technologie du ciment et du béton va de plus en plus être actualisée.

3- Compositions types de béton à HP et THP

Quelques exemples de compositions des bétons, ainsi leurs essais de compression sont regroupés dans la série des tableaux. Il existe trois classes de bétons.

Cependant, une telle classification des bétons est en fonction de leur résistance en compression. Cette résistance étant la résistance caractéristique à la compression à 28 jours (f_{c28}) mesurée sur des éprouvettes cylindriques de 100mm de diamètre et hauteur double $h=200\text{mm}$. Certes, il est nécessaire de rappeler le type d'éprouvette pour effectuer la mesure de la résistance à la compression.

Classe 1: Béton à hautes performance : 50/100Mpa les bétons ayant $0,3 \leq E/C \leq 0,4$

Exemple 1-1

E/C=0.35	Kg/m
Eau	195
Ciment	505
Centre volante	60
Gros-granulat	1030
Granulat fin	630
Réducteur d'eau	975cm ³
Age (jours)	f_{cj} (MPa)
7	50.3
28	64.8
56	72.4
91	78.6

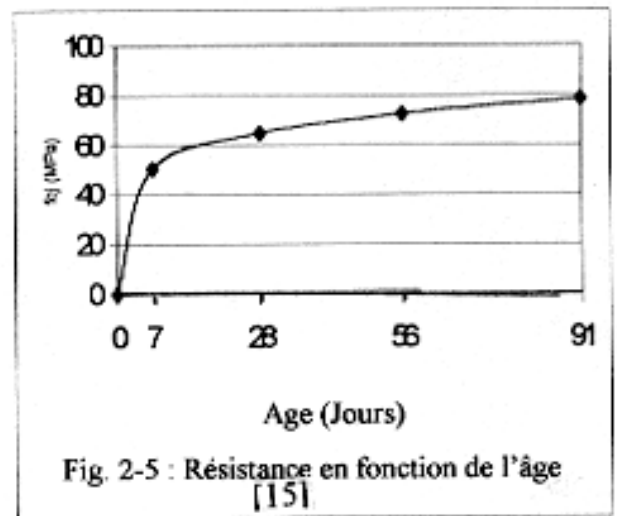


Tableau 2-1 : Composition du béton utilisé lors de la construction de l'édifice River Plaza, Chicago 1974 [15]

Exemple 1-2

E/C=0.30	Kg/m
Eau	145
Ciment	315
Laitier	137
Fumée de Silice	36
Gros granulats	1130
Granulat fin	745
Superplastifiant	5,92/m ³
Réducteur d'eau	900 cm ³
Age (jours)	f_{cj} (MPa)
7	66.9
28	83.4
56	89.0
91	93.4

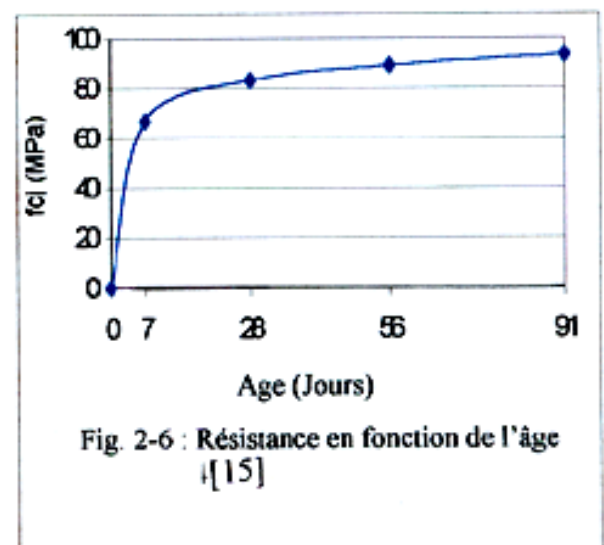


Tableau 2-2 : Nova Scottia Plaza , Toronto. 1988 [15]

Exemple I-3

E/C=0.25	Kg/m3
Eau	145
Ciment (type 111)	570
Gros granulats	1030
Sable	720
Superplastifiant	16.2L/m
Fig. 2-5 : Résistance en fonction de l'âge Age (j ours)	fcj (MPa)
7	82.7
28	92.1
91	103.1

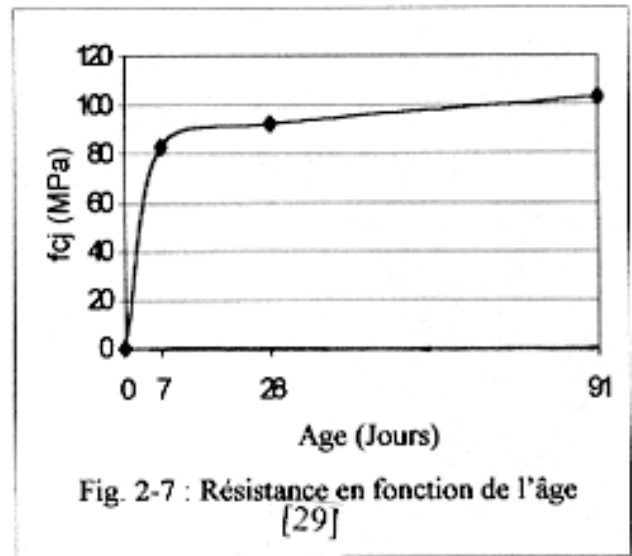


Tableau 2-3 : Yaya diatta- université de Sherbrooke 1985 [29]

Exemple I-4 :

E/C=0.25	Kg/m3
Eau	135
Ciment (type II)	520
Fumée de Silice	30
Gros granulats	1100
Sable	700
Superplastifiant	14.75l
Retardateur	1.24l
Age (jours)	fcj (MPa)
7	77.2
28	92.4
56	104.8
91	106.9

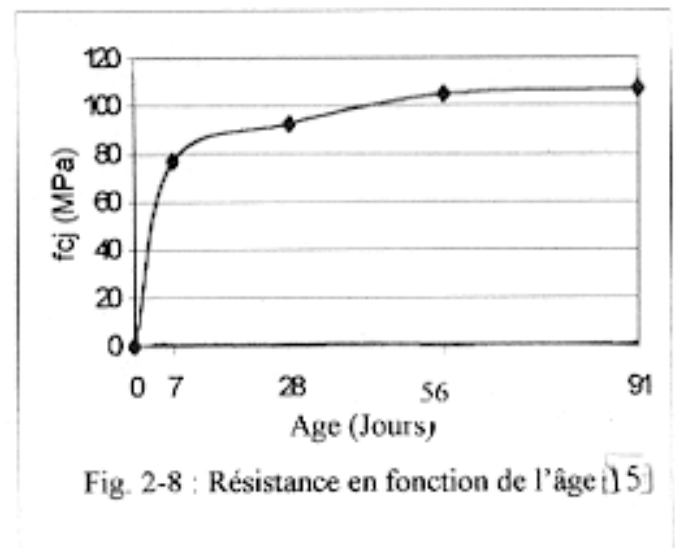


Tableau 2-4 Laurentienne, Montréal 1984

Classe II : Béton à très haute performances : 100 /150 MPa Ils sont obtenus grâce à

- Des matériaux d'excellente qualité (notamment le ciment, la fumée de silice).
- Des techniques de malaxage très efficaces .
- Un rapport $0.2 \leq E/C \leq 0.25$.
- De forts dosages en Superplastifiant et retardateur.

Exemple

E/C=0.23	Kg/m ³
Eau	130
Ciment (type 1,11)	513
Fumée de Silice	43
Gros granulats	1080
Granulat fin	685
Superplastifiant	15.7 L/m
Age (jours)	fcj (MPa)
2	64.8
7	90.7
28	119
91	145

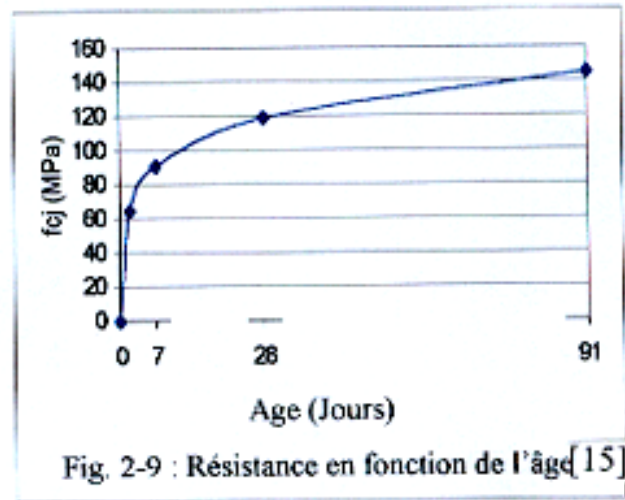


Tableau: 2-5 Two Union Square, Seattle (Etat unis) [15]

Classe III : Béton exceptionnels: au dessus de 150 Mpa

Les bétons exceptionnels, de résistance supérieure à 150MPa, ne sont encore fabriqués qu'en laboratoire. Un béton de 280 MPa à été obtenu dans un laboratoire Danois. Ce béton avait un E/C de 0,16.

En Conclusion ; pour obtenir des BHP, il faut alors avoir de gros granulats très résistants (surtout pour les classes II et III), de très forts dosages en superplastifiants et d'ajouts minéraux.

Au dessus de 100MPa, tous les bétons de chantier fabriqués actuellement contiennent de la fumée de silice.

4- Cure du Béton

Les propriétés du béton après son durcissement, ainsi que sa durabilité dépendent en partie du mode de traitement (type de cure), qu'il aura subit au cours des tous premiers âges (après le coulage).

La cure est un traitement de protection du béton frais, contre toute évaporation rapide d'eau. C'est une technique qui permet la conservation d'une humidité et donc garder une température satisfaisante, au sein du béton; ce qui favorise l'hydratation du ciment (car il n'y aura pas un manque d'eau). L'importance de cette cure est d'autant plus importante que les graphes précédents montrent un gain énorme en résistance dans les 7 premiers jours.

Asselanis et A1 [[dans 14]] ont mené une étude sur l'effet à court terme de la cure sur le développement de la résistance à la compression et le module d'élasticité d'un béton superplastique réalisé avec un rapport $E/(C+FS)$ égal à 0.28 et contenant 10% FS, ont montré qu'un béton dans une cure humide développe un module d'élasticité et une résistance à la compression approximativement 15 =18% plus grands que ceux d'un béton conservé 28 jours à l'air libre.

Des résultats similaires [14] ont été trouvés avec un béton conservé 56 jours.

Cependant, des résultats expérimentaux [10] [41] ont trouvé qu'une cure de 7 jours est suffisante, pour qu'un béton à haute performance développe d'une manière efficace et similaire sa résistance (presque 80% des résistances à la compression sont atteintes à 7 jours d'âge) et sa durabilité.

Une cure humide est hautement recommandée pour les BH P vu le gain énorme en résistance dès les premières heures.

Klieger (cité en référence [10]) rapporte que pour des rapports E/C faibles, il est plus avantageux d'apporter plus d'eau additionnelle lors de la cure que dans des bétons à E/C élevés.

CHAPITRE 3

LES PROPRIETES CONSTRUCTIVES DES BETONS A HAUTES PERFORMANCES

Dans ce travail un béton à hautes performances (BHP) est défini comme un béton hydraulique dont la résistance caractéristique en compression à 28 jours est supérieure à 50Mpa. Au delà de 80MPa, on parle plutôt de bétons à très hautes performances (BTHP). Cette définition est toutefois arbitraire ; elle change d'un pays à l'autre, d'une pratique à l'autre où même d'un auteur à un autre..

Cependant, la résistance élevée des BHP s'accompagne d'une amélioration de la plupart de leurs propriétés d'usage, amélioration que prévoit d'ailleurs l'extrapolation des lois décrivant ces propriétés, lorsqu'elles sont indexées par la résistance du béton

1 Propriétés du Béton à l'état frais.

1-1 Maniabilité

La différence essentielle entre la maniabilité des bétons ordinaires et celles des bétons à hautes performances (BHP) est son maintien dans le temps. Pour le cas des bétons ordinaires, la forte quantité d'eau de gâchage utilisée augmente la fluidité du béton.

Cependant, pour le cas des bétons à hautes performances (BHP), la maniabilité du béton frais est généralement fonction de deux paramètres : le premier est dû au raidissement de la pâte, qui résulte de la consommation progressive du superplastifiant, par les premiers hydrates formé par le ciment ; tandis que le second est dû au risque d'absorption d'eau par les granulats (cas des granulats poreux, qui sont sec lors du malaxage), ce qui diminue la quantité d'eau non liée aux grains solides.

Ces deux paramètres peuvent, pendant seulement une période d'une demi-heure après le coulage, diminuer l'affaissement au cône d'Abrams du béton frais de 22 à 3cm [4]. D'après ce résultat, il est à constater que la maniabilité est très bonne au départ, mais elle ne se maintient pas toujours suffisamment, pour un usage après transport ou un temps d'attente.

Des études [4], [34] ont montré qu'un ajout d'un excès de pâte liante, par rapport à la quantité juste nécessaire pour remplir les interstices des granulats, conduit à un béton de bonne maniabilité, et permet de lui offrir à l'état frais des caractéristiques d'une grande stabilité, ne présentant ni ségrégation ni ressuage.

Le comportement du béton frais est alors fonction de la pâte liante et de ces constituants.

En outre, De Larrard [4] a recommandé les ciments portland artificiel classe 55. (CPA 55) où les ciments à haute performance (CPA HP) à faible teneur en Aluminate tricalcique CA où les HTS (Haute teneur en silice). Car ces types de ciments conduisent à de meilleures maniabilités, avec un rapport eau sur ciment (E/C) le plus faible possible (Tableau 3-1)

N°	Sable Rilem (g)	Ciment		Fumée De silice (g)	Adjuvant Lamard (g)	E/C	Maniabilité
		Nature	Dosage				
01	1350	CPA HP C ₃ A= 10,9%	450	-	13,5	0,314	19"
02	1350	CPA 55 C ₃ A=1,6%	450	-	13,5	0,290	18,5"
03	1350	CPA HP C ₃ A=10,9%	450	90	13,5	0,30	>>15'' Consistance raide
04	1350	CPA 55 C ₃ A=1,6 %	450	90	13,5	0,25	16"

Tableau 3.1 : Influence du rapport (E/C) et le dosage en C3A sur la maniabilité des bétons avec et sans fumée de silice [4]

En effet, l'obtention d'une durée pratique d'utilisation supérieure à une heure est cependant tout à fait possible, en utilisant éventuellement un retardateur de prise, lorsque le ciment contient des aluminates en proportion importante [35]

1-2 Temps de Prise

Sellevoid [30] a trouvé pour une même résistance à la compression, que le temps de début de prise des bétons à hautes performances aux fumées de silice, est inférieur à celui des bétons sans fumées de silice. Ceci est dû à l'importante réactivité pouzzolanique des CSF qui se traduit par une grande cinétique de fixation de la chaux libérée en cours d'hydratation par les CSF, ce qui augmente considérablement la chaleur d'hydratation du ciment des bétons à hautes performances et accélère donc sa prise.

Ceci est confirmé par Bentur et Goldman [31], qui ont trouvé que l'ajout de 15%, de fumée de silice en poids de ciment, accélère la chaleur d'hydratation pendant les trois premiers jours.

1-3 Hydratation

L'évolution de la microstructure en fonction de la cinétique d'hydratation d'un mortier à haute résistance initiale, se traduit en cinq périodes [32].

1-3-1 Période de Gâchage

C'est une période de courte durée : le silicate de calcium tricalcique C3S réagit rapidement avec l'eau, d'une façon exothermique, où on observe alors une augmentation rapide de la conductivité électrique et un pic de flux thermique.

D'après De Larrard [4], la présence de la fumée de silice accélère l'hydratation du ciment. Vernet et Cadoret [32] ont montré que dès les premières minutes, il se forme deux hydrates à germinations rapide

- Le C.S.H (Silicate de calcium hydrate) : formé par la réaction entre les ions calcium Ca^{++} , Les ions $H_2SiO_4^-$ et OH^- du silicate de calcium du clinker.
- L'étringite : formée par la réaction des ions Ca^{++} , $A_{102}S_{04}$ et OH^- provenant de l'aluminate du clinker et du régulateur de prise (gypse) ; dans cette période on assiste aussi au passage en solutions des ions.

1-3-2 Période Dormante

Le processus de passage en solution des ions Ca^{++} et OI^- se produit lentement et le flux thermique sera diminué. Cela est dû à l'élévation rapide du PH et de la teneur en calcium dans l'eau de gâchage. La formation d'étringite et de C.S.H se poursuit lentement, et la phase aqueuse devient sursaturée en chaux.

1-3-3 Période de prise

Cette période se produit lorsque la solution devient sursaturée de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Ce dernier se combine avec les ions de calcium libérés par le ciment (Ca^{++}) et les ions (OH^-) (résultant des silicates de calcium de clinker) et accélère donc la dissolution de tous les constituants du clinker.

De cet effet, résulte alors une augmentation du flux thermique, assez lente au début, qui découle de la précipitation de la portlandite qui est endothermique.

Dans cette période, on assiste donc à la progression de l'hydratation et au début d'interpénétration entre les cristaux de portlandite et d'étringite, ce qui marque le début de la rigidification du matériau.

1-3-4 Période de durcissement

La formation très rapide d'étringite, en fin de période de prise, conduit à l'épuisement du gypse. L'étringite devient alors la seule source de sulfate, et commence à se dissoudre pour former avec l'aluminate excédentaire le mono-sulfo-aluminate.

Cette réaction est accompagnée par un pic thermique qui accélère l'hydratation des silicates. On assiste à un gonflement structural, qui résulte du développement rapide des C-S-H et aux rejoignements des couches disjointes. Dans cet état les cristaux n'ont plus suffisamment de place pour se développer, et la poussée cristalline sera importante. Dans cette période, également, la pâte de ciment aura atteint sa phase de durcissement lent.

1-3-5 Période de ralentissement

Après une quinzaine d'heures, les grains du ciment se recouvrent d'une couche d'hydrates, de plus en plus épaisse. Ce fait ralentit la diffusion de l'eau vers l'interface réactionnelle. Paradoxalement, pour le cas des bétons aux fumées de silice le rôle pouzzolanique ne devient sensible qu'après la première semaine.

2-Propriétés mécaniques des bétons à l'état durci

Pour pouvoir concevoir des structures en béton, l'ingénieur projeteur doit connaître les propriétés mécaniques et physiques du matériau BHP.

Ce matériau est ainsi caractérisé par un certain nombre de paramètres qui permettent de traduire correctement le comportement du béton. Ces paramètres sont fréquemment exprimés en fonction de la résistance à la compression. C'est pourquoi que cette propriété est la plus importante pour identifier ce matériau

2-1 Résistance à la Compression

C'est la plus importante des propriétés d'usage du matériau ; Cette propriété est considérablement améliorée. Des bétons dont la résistance à l'écrasement dépassait 200Mpa ont été obtenus au laboratoire [36], pendant que des structures réelles ont été construites avec plus de 100 MPa de résistance à la compression.

En outre, la cinétique de montée en résistance est notablement plus rapide que celle des bétons ordinaires (Tableau :3-2). Ceci résulte de la proximité initiale des grains de ciment dans les bétons frais, ainsi que du rôle accélérateur des ultrafines. La précocité des résistances dépendra dans la pratique de la teneur du C_3A , du dosage en ciment, de la teneur éventuelle en retardateur de prise, et de la température du béton

Pour les BHP, l'accroissement de résistance au jeune âge est plus rapide (fig.3-1), en comparant avec les bétons ordinaires.

Dès le premier jour la résistance en compression a atteint 53,7 MPa, alors que cette valeur n'est possible qu'au delà du 7e jour dans le cas des BO [37]

Age(j)	1	3	7	14	28	91
Résistance (MPa)						
fcj BHP	53.7	72	86	92.6	106.0	-
fcj BO	33.2	46.5	55.8	61.0	64.00	-

Tableau 3-2 : Variation de la résistance à la compression avec l'âge [37]

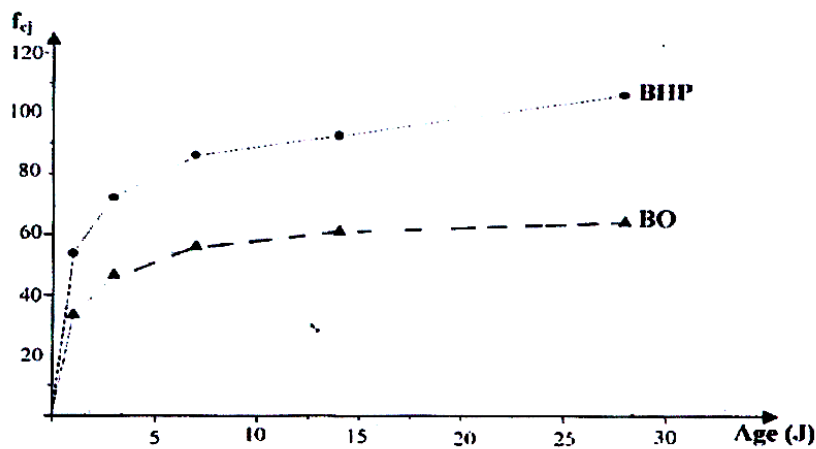


Fig. 3-1 : Montée en résistance des BO et des BHP [37]

Une extension de la loi de Ferêt a été proposée par De Larrard pour expliquer l'effet de la fumée de silice sur la résistance [38]

$$f_{c28} = \frac{k_g \cdot R_{c28}}{\left(1 + 3,1 \frac{e/c}{1,4 - 0,4e^{-11/c}}\right)^2}$$

où

- f_{c28} est la résistance moyenne en compression du béton à 28 jours.
- e , c et s sont les poids respectifs d'eau, du ciment et de la fumée de silice au mètre cube du béton.
- K_g est un paramètre dépendant de la qualité des granulats.
- R_{c28} est la classe vraie du ciment.

D'autres recherches ont lié la variation de la résistance aux modes de conservation : La résistance d'un béton conservé dans l'eau est plus grande que celle d'un béton conservé à l'air libre [14] [7]

Les règlements Français dans leur nouvelles versions prennent en considération cette évolution de la cinétique [1] :

$$f_{ej} = \frac{j}{4.67 + 0.83j} f_{c28} \quad \text{Si } f_{c28} < 40 \text{ Mpa}$$

$$f_{ej} = \frac{j}{1.40 + 0.95j} f_{c28} \quad \text{Si } 40 \text{ Mpa} \leq f_{c28} \leq 60 \text{ Mpa} \quad (3-2)$$

Les résultats concernant la résistance à long terme sont peu nombreux, très dispersés et dépendent beaucoup des conditions de conservation. Des relations ont été proposées pour la détermination de la résistance à la compression à l'infinie connaissant celle en compression à 28 jours [38] .

- Dans l'air $f_c(\infty) = 1,05 f_{c28}$
- Dans l'eau $f_c(\infty) = 1,20 f_{c28}$

La réserve de résistance au delà de 28 jours est améliorée par les ultrafines.

On sait bien que la résistance en compression est influencée par l'âge du béton et, dans une certaine mesure, par la forme et la dimension des éprouvettes testées (tableau 3-3).

	Cylindres 16x32cm faces rectifiées	Cubes 10x10x10cm Face coffrés avec feuilles de cartons interposés	Cubes 20x20x20cm Faces coffrées
Contraintes Moyenne à la Rupture	102 MPa	107 MPa	97 MPa

Tableau 3-3 résistances sur cubes et sur cylindres [4]

Beaucoup de facteurs peuvent influencer sur le résultat des essais de compression tel que le surfaçage des éprouvettes qui est le paramètre le plus important dans le cas des BHP ; son rôle est donc d'éliminer les défauts de surfaces des faces d'appuis des éprouvettes. Dans ce sens, des essais établis par De Larrard [4] sont donnés dans le Tableau 3-4

	Contraintes maximales atteintes en MPa	
	Surfaçage au soufre	Faces rectifiées
Béton HP	50.0 ; 64.3 ; 67,4	69.0 ; 70.0 ; 72.2
Moyenne et dispersion	60.6 ($\pm 12\%$)	70.5 ($\pm 2\%$)

Tableau 3-4: résistances moyennes à la compression obtenue pour différents surfaçages

2-2 Résistance à la traction

La résistance à la traction dépend du type d'essai (traction directe, fendage et flexion). La valeur de la résistance à la traction par fendage (f_{tj}) de ce matériau croit avec celle de sa résistance à la compression (f_{cj}), mais pas dans les mêmes proportions, sous

réserve de confirmation par des résultats plus nombreux. Si bien que le rapport f_{tj} / f_{cj} de l'ordre de 1/12 pour les bétons ordinaires, diminue dans le temps pour atteindre 1/20 pour le BHP [4] [39] [13].

D'après De Larrard [4], la résistance à la traction croit dans des proportions bien moindres que celle de la résistance en compression.

De Larrard [4] a trouvé que le développement des résistances en traction est plus rapide que celui des résistances à la compression, surtout durant les premières semaines tableau: (3-5)

N°	Sable Rilem (g)	Ciment CPA55	Fumée Des Silice	Fluidifiant	Eau (g)	E/C	S/C	% pâte liante	Résistances à 7 jours Flexion Co		Résistances à 28 jours Flexion Co	
									Fr	fc	fr	fc
01	1350	436	174	12.2	91	0.209	0.40	38.3	14	96	18	115
0	1350	582	232	(16.2	1109	10.187	0.40	44.5	14	100	18	111

Tableau 3-5 Résistances mécaniques de mortier comprenant différents volume de pâtes [4]

Dewar (cité en référence [10]) a étudié la relation entre la résistance à la traction par fendage et la résistance à la compression pour les BHP P ($f_{c28j} > 83 \text{ MPa}$). Il a conclut que pour les faibles résistances, la résistance à la traction par fendage est de l'ordre de 10% de celle de la compression, tandis que pour les résistance élevées, elle est d'environ 5%.

Il observe aussi que la résistance à la traction des bétons à granulats concassés est supérieure d'environ 8% à celles des bétons à granulats roulés Ceci est due au fait que les granulats concassés présentent des surfaces rugueuses et donc favorise l'adhérence pâte de ciment-granat. De plus, il trouva que la résistance à la traction par fendage représente 70% de la résistance à la flexion (où module de rupture) à 28 jours. La méthode du module de rupture étant basée sur l'hypothèse du matériau homogène

$$(\sigma = MV / I)$$

Différentes relations empiriques sont proposées : elles sont de la forme [40]

$$f = a + b f_{cj}^n$$

où :

f_{tj} : résistance à la traction par fendage .

Une corrélation en racine carrée de la résistance en compression a été proposée [41], pour la détermination de la résistance à la traction :

$$f = 0,52 \sqrt{f_{cu}} \quad (3-3)$$

où :

f_{cu} étant la résistance déterminée à base de cubes ($50 \text{ Mpa} \leq f_{cu} \leq 100 \text{ Mpa}$)

D'autre part, une équation empirique pour prédire la moyenne à la traction pour des bétons de résistance d'environ 84MPa a été proposé (cité en référence [42]).

$$f_t = 4,34 (f_c)^{0,55} \quad (3-4)$$

f_c : exprimée en Psi (1Psi = 0,006895MPa).

A partir de résultats expérimentaux, Chemrouk et Hamrat [43] ont proposé la formule suivante

$$f_{tj} = 0,8 + 0,05 f_{cj} \quad \text{pour } 20,6 \leq f_{cj} \leq 67,2 \text{ MPa} \quad (3-5)$$

Le groupe de l'association Française de recherches et d'essais sur les matériaux et les constructions (AFREM) [44] à proposé le raccordement d'une formule en puissance 2/3 avec la formule linéaire actuelle pour $f_{cj} = 60 \text{ MPa}$ (fig. 3-2)

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj} \quad \text{pour } f_{cj} \leq 60 \text{ MPa} \quad (1) \quad (3-6)$$

$$f_{tj} = 0,275 (f_{cj})^{2/3} \quad \text{pour } 60 \leq f_{cj} \leq 80 \text{ MPa} \quad (2)$$

L' écart de la seconde formule avec la première dans le domaine 60-80 MPa est très faible (5%), mais la seconde semble extrapolable sans risque au delà de 80MPa.

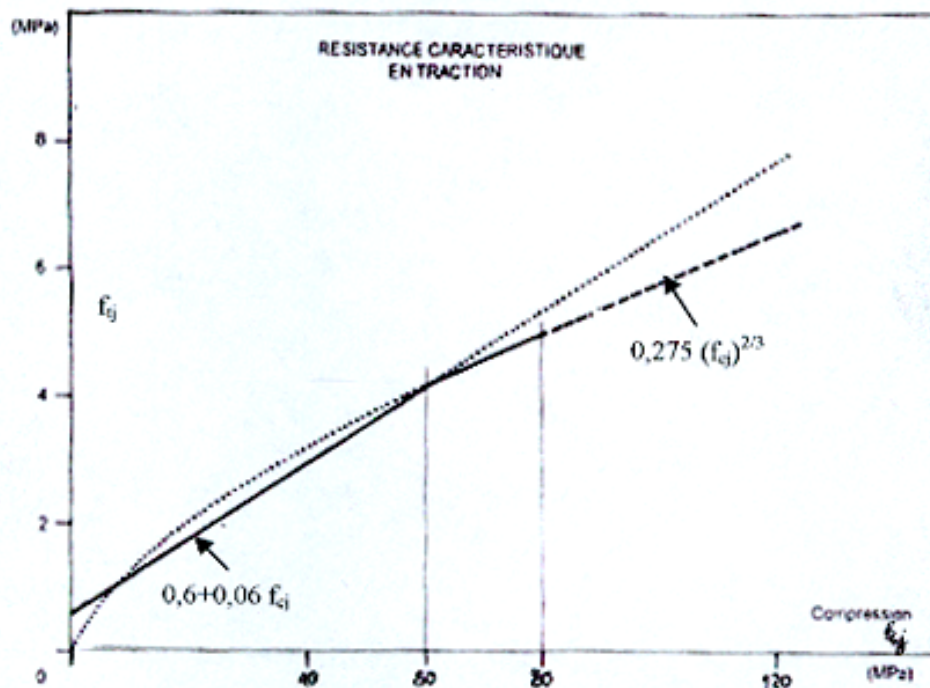


Fig. 3-2 : Résistance caractéristique en traction [44]

Cependant, d'autres chercheurs [45] ont établie une relation entre f_{tj} et f_{cj} comme suit $f_{tj} = 0,564 (f_{cj})^{0,55}$

où: (3-7)

f_{tj} et f_{cj} exprimées en MPa.

D'une manière générale, la résistance à la traction mesurée par flexion ou module de rupture (f_r) a tendance à augmenter quand le rapport E/C diminue. Ceci semble suivre l'évolution de la résistance à la compression même si l'évolution n'est pas de la même manière.

ACI [10] recommande le module de rupture pour les BHP à partir de la relation suivante :

$$f_r = 0,94 (f_c)^{1/2} \quad (3-8)$$

où

$$21\text{MPa} \leq f_c \leq 83\text{MPa}$$

d'autre part, Yaya Diatta [29] rapporte que le module de rupture f_r se présente comme suit :

$$f_r = 2,3\sqrt{f_c} - 10,7\text{MPa}. \quad (3-9)$$

où: $42,6\text{MPa} \leq f_c \leq 103,1\text{MPa}$.

Enfin, la variation de la résistance à la traction en fonction de la résistance du béton passe presque du simple au double entre le code canadien, avec les valeurs les plus faibles, et le code européen (fig. 3-3), les valeurs française se situent entre les deux du côté le plus élevé [46].

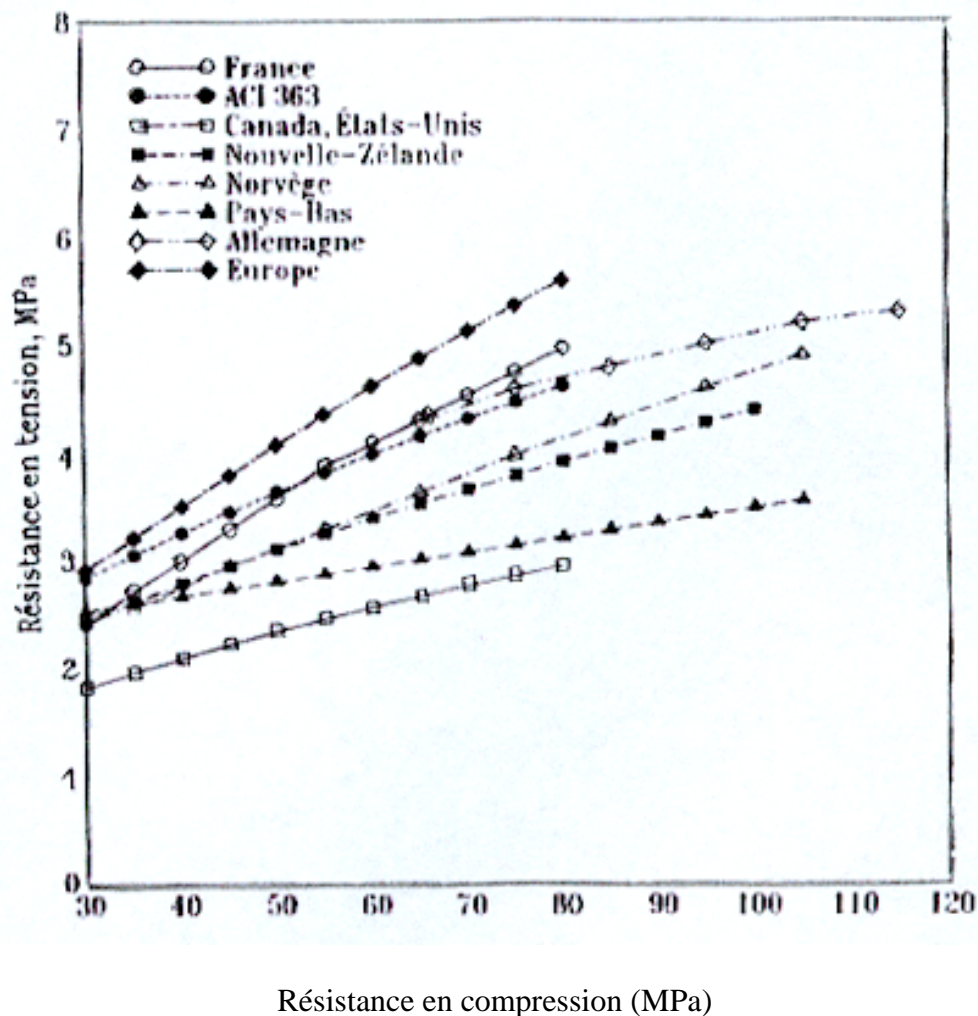


Fig . 3-3 : Résistance à la traction en fonction de la résistance en compression [46]

2-3 Relation contrainte déformation (σ - ϵ) :

Beaucoup de travaux expérimentaux [10],[47],[4],[42],[49] ont été réalisés afin d'étudier la relation entre les contraintes et les déformations pour des BHP sollicités. Tous les travaux rapportent que les BHP comprimés ont un comportement linéaire suivi d'une rupture brutale, cette fragilité du comportement est d'autant plus accentuée que la résistance élevée (fig.3-4)

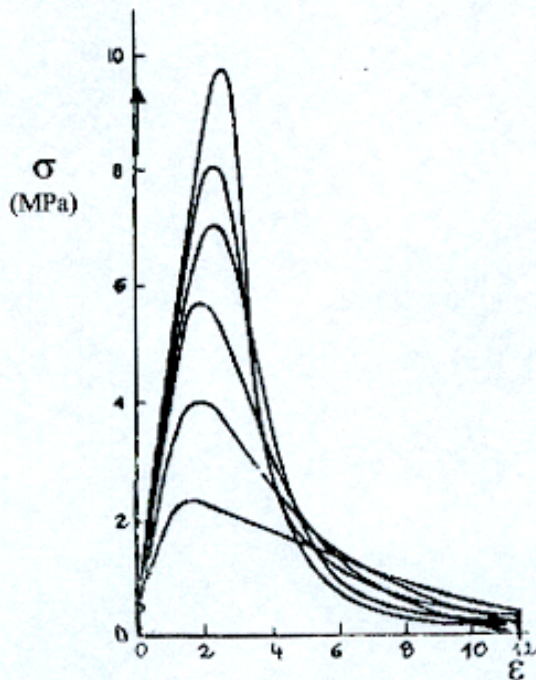


Fig 3-4: (a)

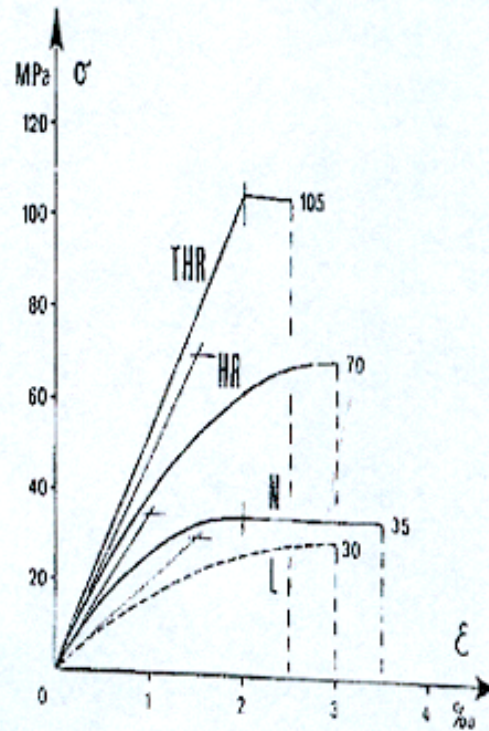


Fig. 3-4 : (b)

Fig. 3-4 : Courbes contraintes-déformations [47]

De façon générale on remarque que dans la figure (3-4) (a) et (b)

- La branche ascendante de la courbe contraintes-déformations (a) est plus linéaire.
- La branche descendante devient plus abrupte pour le BHP (a).
- Le plateau de plasticité est plus important pour le BO ; ce qui nous amène à dire que le BHP est un matériau fragile (b).

Le comportement de ce matériau devient un sujet controversé. Certaines études [45] ont proposé un diagramme parabolique sans palier ni branche descendante, dont le sommet serait à $\varepsilon_x = 0,3\%$ à la différence du BO qui présente un palier très clair se terminant (rupture) à une déformation de 0,35% (fig 3-4 b).

D'autres travaux [49] ont établi un diagramme triangle- rectangle comme en figure 3-5 pour la loi de comportement contrainte-déformation.

Dans la figure 3-4 (b) le comportement triangle- rectangle est très évident pour le BTHP.

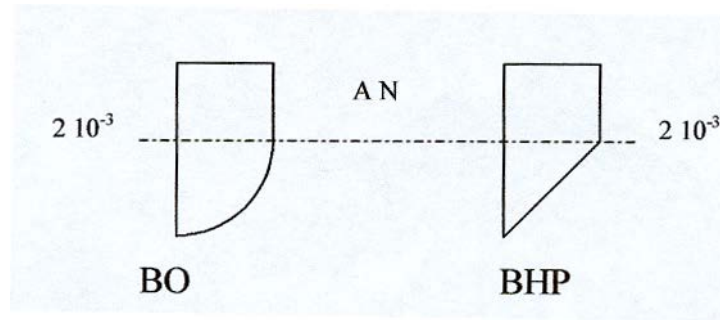


Fig : 3-5 Diagramme contraintes- déformations

D'autre part, le groupe d' AFREM [50] a adopté un diagramme parabole-rectangle (fig.3-6) dont la partie horizontale s'étend entre les abscisses ε_{bc1} et ε_{bc2} avec $\varepsilon_{bc1}=2 \cdot 10^{-3}$ et $\varepsilon_{bc2}=(4,5-0,025 f_{cj}) \cdot 10^{-3}$

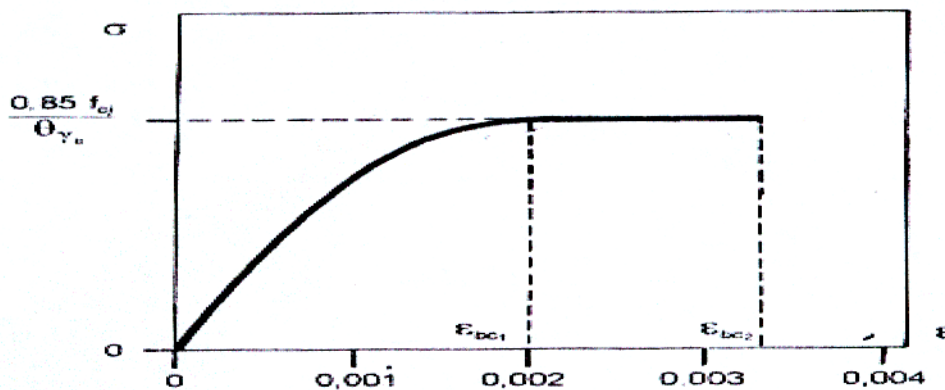


Fig : 3-6 Diagramme contraintes- déformations [50]

2-4 Module d'Elasticité

Thomas et Reader (cité en référence [10]) ont reportés des valeurs du module d'élasticité (E_c) comme étant la tangente à la courbe contrainte-déformation en compression uniaxiale 25% de la contrainte maximale, et sont comprises entre 29 et 36 GPa pour les bétons ayant des résistances comprises entre 69 et 76MPa.

Le module E_c est d'autant plus élevé que le rapport E/C est faible [13].

Cependant, des études ont été menées pour étudier l'influence de la nature des granulats, des caractères propres de la pâte, et la masse volumique du béton sur le module élastique des BHP [13],[39],[46]. A cette occasion, les formules empiriques existantes, prenant en compte la densité du granulat, ont été essayées, comme celles de différents règlements, décrits dans le tableau (3-6)

règlements	Formule	Type d'éprouvette
Norvège	$E_c = 9,5 f_c^{0,3} (\rho/2400)^{1,5}$	Cylindre 100x200
USA	$E_c = 43 \sqrt{(f_c \cdot \rho^3)} \times 10^{-6}$	Cylindre 154x300
Grande Bretagne	$E_c = 1,7 \rho^2 f_{cr} 10^{-6}$	Cube de 100mm

Tableau 3-6 : Formules de prévisions du module d'élasticité, en [GPa] selon 3 Règlements étrangers

Une corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression est donné dans [10] par :

$$E_c = 3320\sqrt{f_c} + 6900$$

lorsque $21\text{Mpa} \leq f_c \leq 83\text{Mpa}$: (3-10)

D'autre part, Hashim [[dans 35]] a proposé l'expression suivante :

$$E = \frac{E_p [(1-g)E_p + (1+g)E_g]}{(1+g)E_p + (1-g)E_g}$$

où

g = volume du granulat.

E_p = module d'élasticité de la pâte liante. E_g = module d'élasticité du granulat.

E : module d'élasticité du béton

En outre, une Loi de la forme [47]: $E_{tj} = K \sqrt[3]{f_{cj}}$ (3-12)

Où :

K : dépend essentiellement du type de granulat (ainsi leur taille et leur proportion dans la composition) et varie entre 9500 et 12500

De Larrard [4] a trouvé qu'un ajout de fumée de silice augmente le module d'élasticité d'environ 30%, (tableau 3-7). Ceci peut s'expliquer par le fait que la fumée de silice densifie le béton et donc augmente le E.

Pédeches [51] a trouvé presque la même amélioration (tableau 3-8).

Cette augmentation du module d'élasticité est due: d'une part à l'augmentation de la concentration des granulats par rapport à la pâte liante, d'autre part au raidissement de cette dernière (il est à signaler que l'interface pâte l granulat ne joue pas de rôle dans le domaine élastique)

	Volume de la pâte Liante %	Module Sécant du Béton GPa	Résistance à la Compression (MPa)
Béton ordinaire BO	31,2	36,8	49
Béton à haute performance (BHP)	28,0	43,8	75
Béton à très haute Performance BTHP)	27,0	53,7	101

Tableau 3-7: Augmentation du module d'élasticité en fonction du raidissement [4]

Dosage en Liant (Kg/m ³)	Résistance à la compression MPa			Module d'élasticité GPa		
	BO	BHP sans Fumée de silice	BHP avec F. S	BO	BHP sans F. S	BHP avec F. S
250	25	31	54	32.7	35.2	41.15
350	50	73	107	40.0	44.1	47.3
500	61.5	85	131	39.0	43.15	48.55
600	68	87	125	39.25	43.4	47.20

Tableau: 3-8 Caractéristiques mécaniques du béton en fonction du dosage en Ciment [51]

Pour sa part, Pomeroy (cité en référence [29]) a établi des formules reliant directement le module d'élasticité à la résistance en compression. Ces expressions sont valides seulement jusqu'à 100 MPa.

$$E_{c28J} = 0,20f_c + 20,0 \text{ (GPa)}, f_c \text{ en Mpa}$$

$$E_{c365J} = 0,19f_c + 24,8 \text{ (Gpa)}, f_c \text{ en Mpa} \quad (3-13)$$

D'autre part Yaya Diatta [29] a établi la corrélation suivante

$$E_c = 0,26f_c + 18 \text{ (GPa)}$$

$$42,6 \text{ MPa} \leq f_c \leq 103,1 \text{ Mpa} \quad (3-14)$$

Le règlement ACI [10] rapporte que

$$E_c = 3,3\sqrt{f_c} + 6,9 \text{ (GPa)} \quad (3-15)$$

$$21 \text{ MPa} \leq f_c \leq 83 \text{ Mpa}$$

La figure 3-7 montre la variation du module élastique en fonction de la résistance du béton.

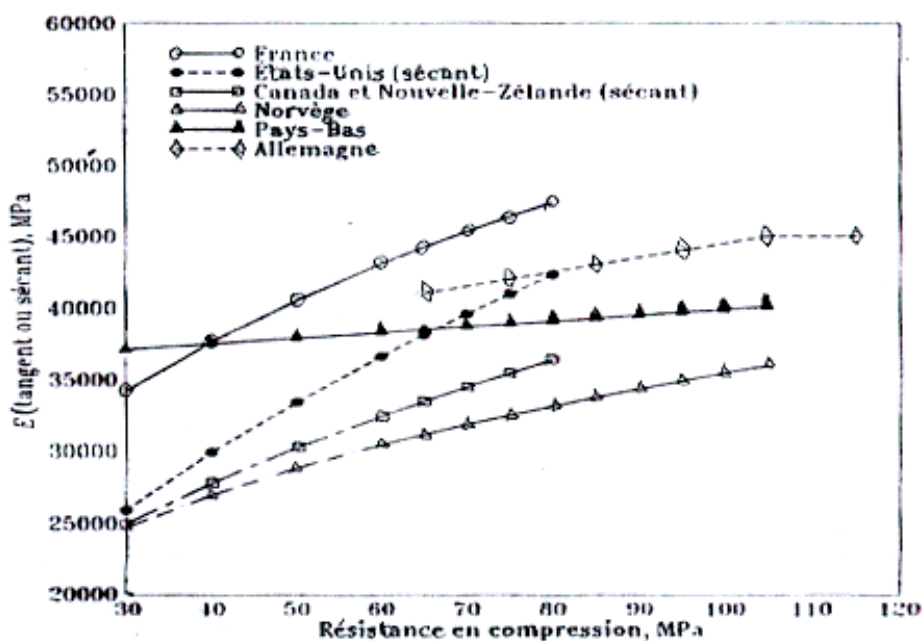


Fig. 3-7 : Module élastique en fonction de la résistance en compression [46]

Bien qu'il s'agisse du paramètre étudié des BHP, la variation entre les différents règlements est très grande, allant jusqu'à 40% entre les valeurs faibles et les valeurs les plus élevées. Un point important à noter est le fait que l'expression du module proposée par le groupe AFREM [46] donne des valeurs supérieures à toute les autres à partir d'une résistance à la compression de 40MPa. Plusieurs raisons expliquent cette différence :

Les granulats utilisés en France pour la confection des BHP ont un module d'élasticité élevé, entre autre, ces granulats sont de grosses tailles (10 à 20mm) par rapport à des tailles de 10 à 15mm utilisés en Amérique du Nord.

2-5 Coefficient de Poisson (ν)

Le coefficient de poisson (ν) est mesuré au cours du chargement à l'état non fissuré. Aucune corrélation entre la résistance en compression et ν des BHP n'a été établie. Le coefficient de poisson croît également lorsque le rapport E/C diminue.

Perenchio et Kliger (cité en référence [10]) rapportent que le coefficient de poisson est compris entre 0.20 et 0.28 pour des bétons ayant une plage de résistance $55 \text{ MPa} \leq f_c \leq 80 \text{ MPa}$.

Kaptain (cité en référence [10]) trouve, par des mesures dynamiques, que le coefficient de poisson varie entre 0.23 et 0.32 pour les bétons dont la résistance à la compression varie entre 17 et 79 MPa .

Pour sa part, YAYA Diatta [29] rapporte que le coefficient de poisson varie entre 0.20 et 0.23 pour des résistances en compression simple entre 43 et 85MPa.

D'autres part, les travaux de Chemrouk [41] et De Larrard [4] ont trouvé $\nu = 0,23$ pour les BHP et $\nu = 0,20$ pour les BO.

Cependant le coefficient de poisson selon le règlement Français, est pris égal à 0.20 pour les bétons non fissurés dont $f_{c28} \leq 60 \text{ Mpa}$.

CHAPITRE 4

DURABILITÉ DES BÉTONS A HAUTES PERFORMANCES

1-Introduction

Parmi les principales caractéristiques des BHP, en plus de leur résistance élevée on cite la porosité très réduite qui fait de ces bétons des matériaux nouveaux aux apports multiples. L'accroissement de durabilité procuré par les BHP constitue sans doute l'apport essentiel de ces matériaux. C'est cette propriété ajoutée à la bonne résistance qui sont à l'origine de leur meilleure performance [54].

La durabilité d'une construction en béton armé peut être définie d'une manière générale comme étant la capacité des deux matériaux constituant le béton armé à maintenir leurs caractéristiques physiques et leurs performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage tout en tenant compte des conditions d'exploitations de cet ouvrage. La durabilité du béton s'explique, en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans le réseau poreux du béton [33].

La perméabilité et la porosité sont deux grandeurs physiques interdépendantes, la première correspond à un écoulement d'un fluide sous gradient de pression (pression motrice) et permet d'estimer la durabilité du béton; la deuxième est une caractéristique spécifique du mélange pâte l granulat [4].

2- Perméabilité et Porosité

La perméabilité ou propriété d'un corps à se laisser traverser par un fluide est considéré comme un critère de durabilité. Les fluides peuvent être l'air, l'oxygène, l'azote, l'eau, les solutions salines.

La perméabilité est donc un important paramètre qu'il faut prendre sérieusement en considération afin de limiter toute attaque chimique aussi bien du matériau béton que l'acier noyé à l'intérieur.

La perméabilité augmente avec la quantité de vide causé par l'évaporation de l'eau et par l'air piégé à l'intérieur du béton durci. Pour réduire cette perméabilité est donc améliorer la durabilité du béton, il faut réduire la quantité d'eau utilisée dans le mélange, compacter suffisamment le béton frais pour remplir tous les vides et par la suite assurer une cure adéquate afin que l'eau ne s'évapore pas mais serve à hydrater le ciment en quantité suffisante [57] .

Des mesures allemandes [40] de perméabilité sur mortier conduisent à des valeurs comprises entre $0,64 \cdot 10^{-12}$ m/s pour E/C=0,40 à $440 \cdot 10^{-12}$ m/s pour E/C=0,75.

Ces résultats sont en concordance avec des essais Américains anciens qui montraient que la perméabilité d'un béton était réduite d'un facteur égal à 1000 lorsque le rapport E/C passait de 0,80 à 0,40.

Egalement, Powers et Coll [55] ont trouvé qu'il existe une forte diminution de la perméabilité, lorsque le rapport Eau/Ciment diminue en dessous d'un rapport eau sur ciment critique (E/C= 0,7). Ce rapport est le rapport Eau/Ciment au-delà duquel le réseau des capillaires reste toujours interconnecté, même après une hydratation complète du ciment (fig. 4-1).

La perméabilité à l'eau diminue donc au fur et à mesure que le rapport E/C diminue et devient négligeable pour E/C=0,26 [58] [59] [60].

Ainsi, l'ajout de laitier ou de cendres volantes ne modifie pas la porosité totale mais conduit à une diminution générale de la dimension des pores. L'adjonction d'ultrafins est en particulier de fumée de silice se traduit parfois par une réduction de la porosité et par une diminution des pores.

La porosité totale des bétons à hautes performances (BHP) est moindre que celles des bétons ordinaires.

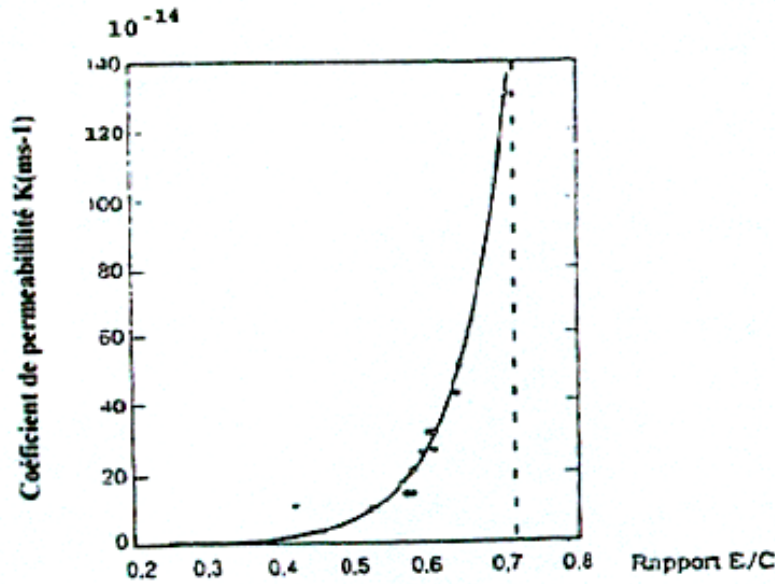


Fig. 4-1 : Relation entre le coefficient de perméabilité à l'eau et le rapport E/C [28]

3- La résistance au gel -dégel

La présence en abondance de pores dans le béton durci permet à l'eau de pénétrer à l'intérieur de la masse. Par temps froid, cette eau gèle et par conséquent augmente de volume. L'expansion de l'eau solide (glace) contenue dans les pores éclate la pâte de ciment durcie et détériore ainsi l'adhérence avec les particules d'agrégats. Des agrégats poreux peuvent aussi rendre le béton vulnérable à l'effet du gel.

Dans le cas des BHP, la perméabilité très faible minimise les risques de dégradation dûs au gel. Le gel n'apparaît donc susceptible d'intervenir que dans les vides d'air occlus qui sont en quantité très réduite et qui peuvent être supprimés par l'incorporation d'entraîneur d'air lors de la fabrication si l'on craint d'importants cycles gel-dégel en présence de sels de devergiaçage [1]

Donc suite à la forte compacité et à la faible perméabilité qui réduisent la présence d'eau dans le béton (moins de pores), les BHP résistent bien aux cycles gel-dégel et à l'écaillage de surface [62] [61] [1].

4- Le Comportement vis à vis des agressions chimiques

4-1 Réaction Alkali - Granulat.

Les granulats peuvent contenir naturellement des silicates pendant que les Alcalins sont présents en abondance dans le ciment (Na_2O ; Ca_2O ; K_2O). Alors en présence d'eau ou d'humidité, une réaction chimique se produit entre les silicates ou minéraux siliceux contenus dans les granulats et les composants alcalins, qui sont des hydroxydes produits de la réaction d'hydratation ($\text{Ca}(\text{OH})_2$; $\text{Na}(\text{OH})_2$; $\text{K}(\text{OH})_2$) de la pâte de ciment, en donnant un gel; ce gel alcali - silicate absorbe l'eau des pores contenue dans le béton où venant de l'extérieur par temps humide et augmente de volume et donc en gonflant fait éclater le béton Une dislocation interne du béton se produit et sort jusqu'à la surface du béton sous forme de fissures [57]

Au sein des BHP, l'apparition de ce type de dégradation est minimisée par la porosité fine et discontinue qui réduit les diffusions ioniques à travers la matrice et l'interface pâte / granulat , par une réduction de la teneur en chaux et par un taux d'humidité réduit.

Cependant, Aitcin en 1985 [54] a trouvé qu'il existe un optimum dans la gamme de 7 à 25% de fumée de silice qui permet de réduire où d'annuler cette réaction. Ceci, malgré qu'il soit en présence des granulats réactifs et d'un ciment ayant une forte teneur en sodium 1,1% en Na_2O . La fumée de silice densifie la pâte de ciment et empêche toute humidité de pénétrer pour déclencher la réaction Alkali-granulats.

Le comportement amélioré des BHP vis à vis de ce problème a été confirmé ultérieurement par d'autres travaux [30].

4-2 l'action de l'environnement salin

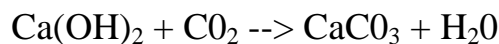
Le phénomène de dégradation résultant d'un tel environnement est similaire à celui du gel . Le sel soluble, généralement des chlorures ou des sulfates, se cristallise dans les pores et en se cristallisant exerce une pression d'une manière similaire au gel et ainsi détruit l'adhérence entre les agrégats et la pâte de ciment ou fait éclater cette dernière.

Ce type d'attaque est fréquent dans les régions désertiques et dans les milieux marins ou proche de la mer.

Si le risque est estimé important, l'emploi d'un ciment enrichi en laitier peut être une solution, mais un dosage en fumée de silice de 15% peut aussi écarter toute crainte. Le laitier où la fumée de silice densifient la pâte de ciment et donc réduisent les vides occupés par les sels solubles.

4-3 Carbonatation - Corrosion des aciers

Le dioxyde de carbone CO_2 ou gaz carbonique et d'autres gaz dans l'atmosphère peuvent pénétrer le béton surtout quand il est poreux et perméable. Le gaz carbonique et les autres gaz peuvent réagir avec les alcalins tel que l'hydroxyde de calcium dans le béton pour former des composants neutres tels que le carbonate de calcium CaCO_3 dans la manière suivante



L'effet résultant est la réduction de l'alcalinité du milieu, c'est le processus de carbonatation .

La pénétration du gaz carbonique à travers les pores et les fissures réduit l'alcalinité du béton et donc détruit l'environnement passif, laissant les aciers dans des conditions susceptibles à la corrosion. Cette passivité du milieu alcalin peut aussi être détruite par les sels et en particulier les chlorures [57].

Les ions chlorures proviennent de l'environnement des ouvrages (atmosphère saline, fumée industrielle). La vitesse de diffusion de ces ions dans le béton est plus rapide que celle du gaz carbonique. Lorsqu'ils atteignent les aciers, la corrosion s'amorce sous forme de piqûres conduisant avec le temps à la rupture de ces aciers.

Dans les régions fissurées, le processus de carbonations peut pénétrer profondément. Pour un béton saturé, les pores du béton sont bloqués par l'eau et par conséquent le gaz a des difficultés de pénétration.

D'autre part, pour un béton sec, le processus de carbonatation ne peut pas avoir lieu du fait que la réaction nécessite la présence d'humidité pour qu'elle puisse avoir lieu.

La corrosion des aciers commence quand il y a suffisamment d'oxygène et d'humidité, Son processus chimique est le suivant



Afin d'éviter tout risque de corrosion, le BAEL 91 [65] propose l'enrobage des armatures présenté au tableau (4-1) ci dessous.

Condition d'exposition	Epaisseur minimale d'enrobage des armatures (cm)
Environnement sec pour intérieur de locaux	1
Environnement humide et agressif pour ouvrages exposés aux intempéries, condensations et en contact avec les liquides.	3 ou 2 si la résistance caractéristique est supérieure à 40 MPa.
Environnement très agressif pour exposition à la mer, aux embruns, brouillards salins, fondants et en atmosphère chimiquement agressive	5 ou 3 si les armatures sont protégées par un procédé efficace

Tableau 4-1 : Epaisseurs minimales d'enrobage des armatures à respecter, en fonction Des conditions d'exposition selon le BAEL 91 [65].

Compte tenu de leur perméabilité, la profondeur de carbonatation des BHP, à un âge donné, est environ deux fois moindre que celle d'un béton ordinaire [1].

La diffusion du gaz carbonique sera difficile dans un béton peu poreux avec un rapport E/C réduit; Donc à priori, le BHP s'apprête bien aux problèmes de carbonatation et donc de durabilité à long terme.

4-4 Pénétration des ions sulfates

Les sulfates sont en abondance dans l'eau de mer et dans les sols sous forme soluble et donc affectent les ouvrages de mer et les ouvrages enterrés. Ces sulfates qui sont des sels minéraux réagissent avec l'aluminate tricalcique (C₃A) hydraté de la pâte de ciment durcie résultant en une expansion et donc éclatement du béton.

Parmi les sulfates les plus agressifs, on distingue les sulfates de sodium et de potassium (Na₂SO₄ et K₂SO₄).

La résistance aux ions sulfates, liée également à la perméabilité, devrait être meilleure pour les BHP puisque le matériau est compacte donc moins perméable à la pénétration profonde de ces ions sulfates. Ces attaques seront cernées à la couche extérieure du matériau [63].

L'utilisation d'un ciment résistant aux sulfates est souvent conseillée dans les endroits où le béton est exposé de façon intense aux sulfates. On l'utilise principalement dans le cas où le sol ou les eaux souterraines ont une forte teneur en sulfates. Le gain de résistance pour ce type de ciment est plus lent que celui du ciment portland ordinaire. Sa résistance élevée aux sulfates est attribuée à une faible teneur en aluminate tricalcique (C₃A) [12]. Le tableau 4-2 nous donne les concentrations en sulfates au delà desquelles l'utilisation de ciment portland résistant aux sulfates est nécessaire.

Classe d'exposition	Degré d'exposition	Sulfates hydrosoluble (SO ₄) dans l'échantillon de sol, en %	Sulfates (SO ₄) dans l'eau de la nappe phréatique, mg/l	Resistance minimale spécifiée à la compression à 28 jours (MPa)	Rapport maximal eau/liant	Type de ciment portland à utiliser
S-1	Très intense	Plus de 2,0	Plus de 10000	35	0,40	Ciment portland résistant aux sulfates
S-2	Intense	0,20 à 2,0	1500 à 10000	32	0,45	Ciment résistant aux sulfates
S-3	Modérée	0,10 à 0,20	150 à 1500	30	0,50	Ciment résistant aux sulfates où ciment à faible chaleur d'hydratation

Tableau 4-2 : Exigences relatives au béton exposé aux attaques des sulfates [12].

Dans le cas où le risque estimé est important, l'emploi d'un ciment enrichi en laitier peut réduire le risque [1]. .

Selon De Larrard [4], un dosage de 15% de fumée de silice, en poids de ciment, dispense de l'utilisation d'un ciment spécial résistant aux sulfates.

5- résistance au feu

Vue la microstructure dense du béton, une élévation de la température engendre une forte pression interne ; ce qui va causer des microfissurations internes conduisant à une chute de la résistance; et probablement à un éclatement de la couche superficielle du béton [62].

D'après le règlement BAEL91 [65], les BHP, exposés à l'incendie, présentent un risque d'éclatement superficiel supérieur à celui des bétons ordinaires. Pour cette raison, il est préférable d'introduire des fibres (fibres de carbone, car il résistent à la température) afin d'éviter l'éclatement superficiel du béton.

	Béton ordinaire	Béton à Moyenne résistance			Béton à haute Résistance		
		0	8	16	0	8	16
Fumée de silice	0	0	8	16	0	8	16
Rapport E/C	0,71	0,46	0,53	0,58	0,26	0,27	0,29
Résistance à la compression (Mpa) fc	40,7	75,9	75,9	60,7	112,4	99,3	120,7
320°C fc	39,11	68,76	65,5	57,78	106,44	88,47	78,45
520°C fc	29,58		44,1	36,42	84,30	60,57	50,7
700°C fc	18,52	32,1	26,6	24,28	53,95	36,74	32,95

Tableau :4-3 : Résistance en compression pour mortier exposés à de très hautes Températures [64]

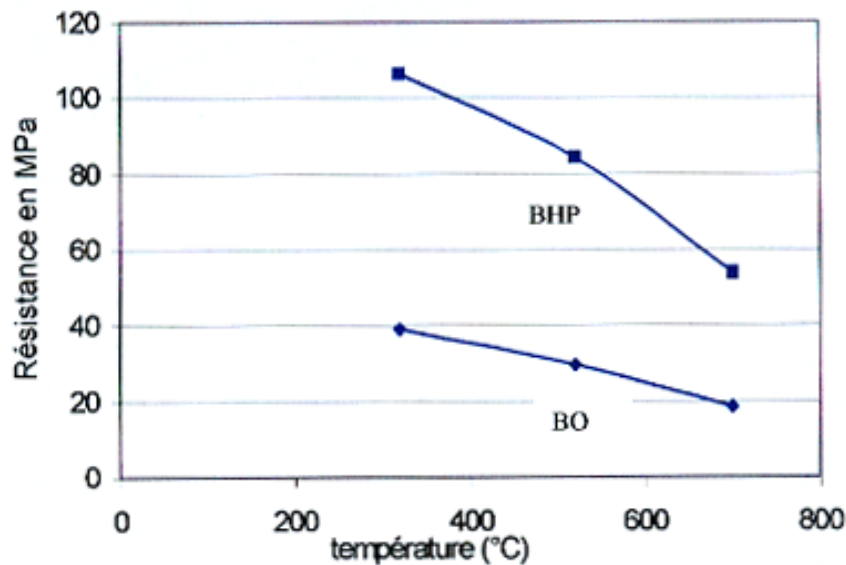


Fig. 42: Résistance en compression en fonction de la température

Nous remarquons une diminution de la résistance en fonction de l'augmentation de la température. Toutefois, cette diminution de la résistance est beaucoup plus accentuée dans le cas du BHP.

Ceci est due au fait que les BHP étant plus compactes, dissipent plus de chaleur et donc sont plus affectés par les hautes températures que le BO.

6- résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion est obtenue, lorsque les surfaces du béton atteignent une haute résistance mécanique.

La nature du plus gros granulats (origine minéralogique et résistance intrinsèque) et le rapport E/C ont une grande influence sur la résistance à l'abrasion d'un béton [1].

Des expérimentations canadiennes [1] ont prouvé que les BHP ont une meilleure résistance à l'abrasion.

Des travaux norvégiens sur la résistance à l'abrasion de chaussées supportant une circulation lourde de véhicules à pneus cloutés concluent à une réduction de 50% de l'abrasion lorsque la résistance du béton passe de 50 à 100 Mpa.

La réduction de la porosité et la forte adhérence pâte -granulats qu'ont les bétons à hautes performances (BHP) aux fumées de silice permettent d'améliorer considérablement la résistance à l'abrasion du béton.

En conclusion, le BHP apparaît comme plus durable que le béton ordinaire, propriété à relier à sa grande imperméabilité (porosité fine et connectée). Toutefois, le BHP reste

sensible à la dessiccation et présenterait des risques au feu comme le montre la figure (4-2). Le constructeur se doit donc de soigner la cure pour profiter au maximum des performances du matériau.

CHAPITRE 5

FORMULATION DU BHP.

1-Introduction

La littérature disponible à nos jours sur le BHP et dont l'essentiel est revu dans ce travail a permis de constater l'absence d'une méthode universelle dans la formulation de ce matériau. On tentera dans cette partie d'indiquer un procédé permettant d'élaborer une formulation en utilisant les matériaux locaux. Ce procédé consiste: premièrement au choix des constituants en assurant les qualités requises, deuxièmement à la détermination de leurs quantités nécessaires.

Notons que la formulation arrêtée sera utilisée pour deux types de béton à haute performance : Un béton à granulométrie continue et un autre à granulométrie discontinue.

2- Choix des matériaux

2-1-Le ciment

Le ciment qui sera utilisé dans cette étude appartient à la classe Portland avec ajouts) et provient de la cimenterie de Meftah, livré dans des sacs de 50 kg.

Les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont données dans le tableau (5-1)

Composition chimique								
S102	CaO	MgO	Fe2O3	A12O3	S03	PF	Caol	RI
20.75	63.38	1,09	3.11	5.29	2.40	2.64	0.29	0,95

Composition Minéralogique.				
Elément	C3S	C2S	C3A	C4AF
%	58,98	12,45	8,70	9,46

Essais physico-Mécanique		
Densité (g/l)	1032	
Surface spécifique (cm) blaine.	3107	
Temps de prise	Début : 1,56	Fin: 3.43
Résistance à la compression (Mpa)	2 jours	19,10
	7 jours	38,02
	28 jours	49,72 (Mpa)
Consistance normale %	27,16	

Tableau (5-1) caractéristiques du ciment

Les résultats du tableau (5-1) proviennent de la cimenterie de Meftah Pour éviter toutes variations sur la qualité du ciment tout au long du projet, on a utilisé des sacs de ciment provenant d'une même séquence de production. On a fait un bon entreposage du ciment en couvrant les sacs d'une toile de plastique.

Cela s'est avéré très efficace car durant tous les travaux de laboratoire, on n'a constaté aucune prèhydratation.

2-2 Eau de gâchage

Elle doit être propre et ne doit pas contenir des matières en suspension au delà de 2g/l pour les bétons de hautes qualité ou 5g/l pour les bétons courants. Elle ne doit pas contenir des sels dissous au delà de 15g/l pour les BHP.

Nous utiliserons l'eau du robinet car elle satisfait les conditions précitées

2-3 Les granulats

2-3-1 Le Sable

Les caractéristiques principales requises pour un bon sable à béton sont la propreté définie par l'essai d'équivalent de sable et la granularité déterminée par le module de finesse .

L'équivalent de sable a pour but de mettre en évidence la proportion relative des poussières fines nuisibles ou d'éléments argileux. Selon la Norme Française 18-598, il s'obtient par agitation « 90 coups » d'une certaine quantité de sable dans une solution lavante (eau distillée) puis on laisse reposer et on relève la hauteur du dépôt de sable « h2 » et du dépôt floculât «h1 ».

Dans notre cas , nous utiliserons le sable d'oued (BAGHLIA).

L'essai de l'équivalent de sable a donné les résultats suivants :

$$ES = h_2 / h_1 = 73,9\% \text{ avant lavage du matériau}$$

$$ES = 93,9\% \text{ après lavage du sable.}$$

Quant à la granulométrie de ce sable, elle est résumée dans le tableau 5-3 et graphe 5-3 Le module de finesse représentant le 1/100 de la somme des refus a été trouvé égal à 3,12.

Sur la base de ces résultats, nous pouvons considérer que l'échantillon de sable analysé est propre et grossier et donc conviendrait pour la confection d'un BHP.

2-3-2-Graviers.

De même que les autres constituants, les graviers doivent avoir des caractéristiques qui vérifient certaines qualités telles que la propreté et la dureté.

Pour ce qui est de la propreté, elle se définit en fonction du pourcentage des impuretés qu'elle contient . Ces impuretés peuvent être de différentes origines : éléments très fins, matières organiques, sulfates ou sulfures.

Les résultats de l'analyse de la propreté sont donnés dans le tableau qui suit (5-2)

Granulats	P1(g)	P2(g)	(P1 -P2) g	% Impuretés	Conclusion
3/8	1000	965	35	3.63	<5% bon
8/15	1500	1456	44	3,02	<5% bon

Tableau (5-2) Analyse de la propreté.

Où : P1 : Poids échantillons avant lavage.

P2 : // // après lavage.

P1-P2 : Pourcentage d'impuretés.

Quant à l'essai de Los Angeles qui traduit le rapport des fines granulat :

$$LA = 1000 \text{ m/M}$$

Le résultat de cet essai a donné comme suit :

$$LA=21 \text{ pour granulat de classe 8/15}$$

$$LA=19 \text{ pour granulat de classe 3/8}$$



Fig. 5-1 : Essai de Los Angeles

L'essai Los Angeles donne un coefficient compris entre 15 et 25, ce qui signifie que ces granulats sont entre la moyenne et la bonne qualité et peuvent être utilisés pour la fabrication des bétons améliorés.

Nous pouvons dire que ces granulats sont normalement denses, propres, de forme et de granulométrie satisfaisante. Ils sont donc au même titre que le sable utilisables sans aucun inconvénient pour la confection des bétons à haute performance.

Remarque : Tous les essais concernant l'identification des matériaux ont été réalisés à la SAPTA sauf le tamisage et l'équivalent de sable qui ont été réalisés au laboratoire de structure de L'USTHB

2-3-3 Analyse granulométrique :(NF P18304)

L'analyse granulométrique sera effectuée après tamisage mécanique et lavage des granulats .(voir figure 5-2)



Fig : 5-2 Tamisage et Lavage des Granulats

Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés dans le tableau (5-3). Quant à l'évolution de la courbe granulométrique, elle est illustrée par la figure (5-3).

Echantillons	S1	G1	G2
Ouvertures des tamis	% des Tamisats		
6			100.0%
12.5			92.4
10		100.0	66.4
8		99.5	33.0
6.3		86.6	11.8
5	100	58.98	6.3
2.5	81.34	4.64	
1.25	59.8	1.04	
0.63	39.78	0.54	
0.315	14.09		
0.16	2.9		
0.08	0.83		
M V apparente	1.54	1,38	1.41
M.V absolue	2.70	2,67	2.69
Equivalent de sable	73.9% avant lavage 93,9% après lavage		-
Module de finesse.	3.12		-

Tableau (5-3) : Analyse granulométrique des granulats

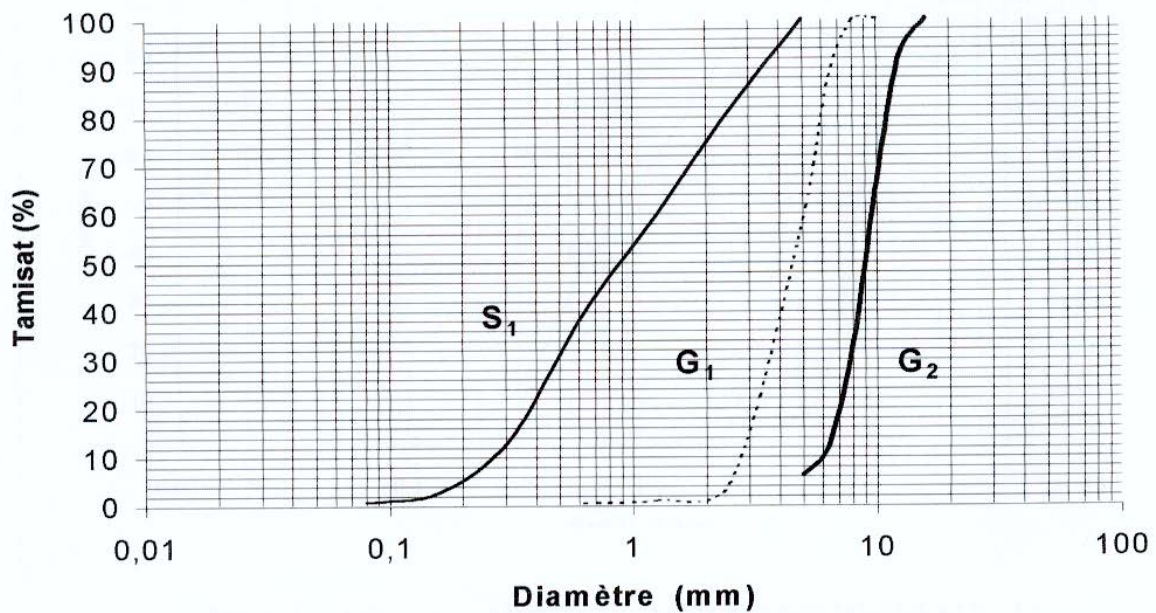


Fig. 5-3: Analyse granulométrique sable et granulats (3/8 et 8/15)

- S1 : Sable d'oued de Baghlia »
- G1 : 3/8 concassé « ENOF Keddara »
- G2 : 8/15 concassé « ENOF Keddara »

Comme nous l'avons signalé en introduction, ces granulats seront utilisés dans deux types de béton : à granulométrie continue et à granulométrie discontinue.

En fait, pour le béton à granulométrie continue les trois différents constituants (S1, G1, G2) seront utilisés.

En revanche, pour le béton à granulométrie discontinue, seuls les deux premiers constituants (S1, G2) seront utilisés

2-4 Superplastifiant

La société GRANITEX (ALGER) met sur le marché deux types d'adjuvants ou fluidifiants (appartenant à la famille des superplastifiants qui sont généralement utilisés dans la fabrication de BHP). Ce sont d'une part les medafluids SF et SFA à base de naphthalène sulfonates , et d'autre part les medaplasts SP à base de résine mélanines.

- Le Medafluid SFA est un superplastifiant réducteur d'eau avec pour action secondaire une accélération du durcissement. Il est composé de polymères spécialement formulés pour conférer aux bétons des propriétés rhéoplastiques. Il permet d'obtenir des bétons fluides ayant des affaissements au cône d'abrams de 16 à 20cm s'écoulant facilement sans aucune ségrégation.

- Le Medaplast SP est un superplastifiant réducteur d'eau pour béton, compatible avec tous les types de ciment et se diluant parfaitement dans l'eau de gâchage.

Les caractéristiques de ces deux superplastifiants données par le fabricant (Granitex) sont résumées dans le Tableau (5-4).

	Medaplast SP	Medafluid SFA
Caractéristiques	Densité : 1,18 (±0,01) PH : 7-8 Teneur en clore : < 1g/l	Densité: 1,20 ± 0,01. PH : 7-8 Teneur en clore : < 1g/l
Dosage	Béton ordinaire : 0.5% à 1% du poids du ciment BHP 3% à 4% du Poids du ciment	Il varie de 0,8 à 1,6% du poids du ciment.
Propriétés et Effets	<u>Béton durci</u> • Améliore les résistances mécaniques. • Diminue la porosité • Augmente la durabilité du béton • Améliore l'adhérence granulats-ciment.	<u>Béton durci</u> • Améliore les résistances mécaniques. • Augmente la durabilité du béton. • Diminue l'absorption capillaire.

Tableau (5-4): Caractéristiques des superplastifiants

3- Optimisation du squelette granulaire.

Le béton à l'état frais comprend deux phases : Une phase solide constitué du squelette inerte (granulats et sable) et une phase qu'on peut assimiler à un liquide viscoplastique, formée par l'eau, le ciment et les additifs organiques.

Par le mélange de ces deux phases, on peut chercher à reconstituer une roche massive, laquelle se caractérise par une porosité quasi-nulle, donc une meilleure durabilité à long terme.

Ceci pourrait bien se faire en combinant le mieux possible les différentes classes des granulats ce qui permettrait d'optimiser le squelette granulaire, qui satisfait aux conditions d'une ouvrabilité acceptable et d'une meilleure résistance à la compression. Les méthodes d'optimisation du squelette granulaire peuvent être : théoriques (ou semi empirique) ou expérimentales.

Dans la présente étude , le squelette granulaire est déterminé en premier lieu, d'après la courbe granulaire établie suivant la méthode Dreux Gorisse [56]. Le squelette granulaire est optimisé une seconde fois par une méthode expérimentale ou on cherche par approximation successive, l'ensemble de ces proportions relatives des différents constituants qui permettent d'assurer à la fois un meilleur affaissement au cône d'Abrams et des meilleures résistances à la compressions à 7 jours et 28 jours. Cette méthode expérimentale nous permettra probablement, d'avoir une formulation locale, en fonction des matériaux et des conditions réelles de chantier.

3-1 Méthode Dreux- Gorisse

Par cette méthode, on détermine en premier lieu, le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats et en second lieu leurs volumes absolus et finalement leurs différentes masses. Son application à nos matériaux a donné les compositions résumées par les tableaux (5-5) et (5-6) pour les bétons à granulométrie continue et béton à granulométrie discontinue respectivement.

Graviers 3/8 (Kg /m3)	Graviers 8/15 (Kg /m3)	Sable (Kg /m3)	Ciment (Kg /m3)	Eau (Kg /m3)
200	890	650	450	225

Tableau (5-5) : Composition du béton à granulométrie continue par la méthode Dreux- Gorisse

Graviers 8/15 (Kg /m3)	Sable (Kg /m3)	Ciment (Kg /m3)	Eau (Kg /m3)
1119	680	450	225

Tableau (5-6) :Composition du béton à granulométrie discontinue par la méthode Dreux Gorisse

3-2-Optimisation par la méthode expérimentale ou méthode « BARON-LESAGE

La formulation trouvée par la méthode de Dreux-Gorisse sera prise comme base de départ pour l'optimisation du squelette granulaire par la méthode expérimentale

La méthode expérimentale suivie sera celle développée au laboratoire centrale des ponts et chaussées de Paris (LCPC) [27] qui stipule que : les proportions maximales, d'un squelette granulaire correspondent au mélange de maniabilité maximale dans un manibillimètre LCL.

3-2-1 Béton à granulométrie continue

Commençons alors par fixer les quantités (C et E en kg/m³). Puis, par trouver les poids de sable, gravillon (3/8) et gravier (8/15) (respectivement S , g G) qui donnent le plus faible temps d'écoulement au maniabilimètre LCL. Ainsi, la granularité du béton étudié, et donc son temps d'écoulement dépend de deux paramètres :

$$X = \frac{S}{G+g} \quad , \quad Y = \frac{g}{G}$$

La valeur du paramètre Y est fixée à priori (voir annexe 1).

La méthodologie suivie pour la détermination des quantités optimales des granulats (S g G) est basée sur la méthode de Baron Lesage et consiste à

- Fixer la valeur de g / G , puis faire varier la quantité de S jusqu'à trouver le temps d'écoulement le plus faible.
- Refaire la même chose pour de nouvelles valeurs de g / G .
- Tracer la courbe des temps minimums d'écoulement en fonction du rapport $S/g+G$.

Les quantités de sables donnant une maniabilité optimale en fonction d'un rapport g/G donné sont données dans le tableau (5-6)

La courbe de la figure 5-4 est le résultat de la colonne temps LCL en fonction de la colonne ($S /g +G$) du tableau (5-6).

N°	G	g	S	E	C	g/G	S/g+G	Temps LCL
1	950	190	684	225	450	0,20	0,6	10 s
2	900	207	653	225	450	0,23	0,59	9 s
3	870	220	650	225	450	0,25	0,596	7 s
4	750	225	565	225	450	0,30	0,58	11 s
5	862	302	710	225	450	0,35	0,61	12 s

Tableau (5-6) : Mesure de maniabilité pour optimisation du squelette granulaire par la méthode expérimentale

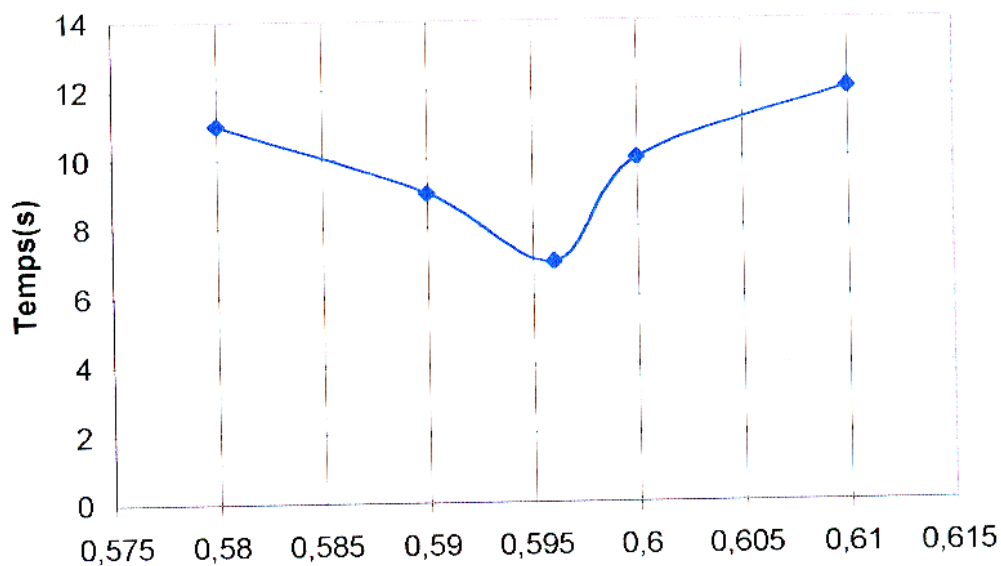


Fig.5-4 : Optimisation du rapport S/(G+g)

Les proportions optimales des constituants correspondent au minimum de la courbe

$$t = f\left(\frac{S}{g+G}\right)$$

Dans notre cas, cette optimisation correspond au rapport $g/G = 0.25$ pour un $S/g+G = 0.596$.

Donc la composition de « référence » adoptée par la suite de l'étude sera la suivante..

Ref	Granulats 3/8	Granulats 8/15	Sable de rivière	Ciment CPJ 45	Eau du robinet	g/G	S/g+G
N°	220	870	650	450	225	0,25	0,596

Tableau 5-8: Composition adoptée (Kg/m)

3-2-2 Béton à granulométrie discontinue

La même méthodologie est reprise pour le cas du béton à granulométrie discontinue, mais elle est plus simple cette fois-ci puis qu'on a affaire à deux types de granulats uniquement (S1 et G2).

La formulation arrêtée est résumée par le tableau (5-9)

Graviers 8/15	Sable de Rivière	Ciment CPJ 45	Eau du Robinet	S/G
1070	720	450	225	0,67

Tableau (5-9) : Formule du BHP à granulométrie discontinue - Poids en Kg/m³

4- Détermination du dosage en superplastifiant

La quasi totalité de la littérature concernant le dosage des superplastifiants fait référence à la méthode des coulis développée par De Larrad [4]. Cette méthode n'est autre que l'extrapolation de la méthode de Baron -Lesage, développée pour le béton ordinaire, au béton à haute performance. Mais, pour des raisons économiques, De Larrad l'a appliquée pour les pâtes des ciments au lieu du béton et l'appelée : « Méthode des coulis ».

Pour notre étude et vu la non disponibilité du cône de Marsh, moyen nécessaire pour la méthode des coulis, nous allons procéder autrement pour la détermination du dosage en superplastifiants .

Notre méthode consiste tout simplement à faire varier le dosage en superplastifiant en gardant constante la composition de référence. Puis de recenser la maniabilité (slump) et la résistance à 7 jours.

Notons que GRANITEX a mis à notre disposition deux superplastifiants (SP,SFA). Les deux fluidifiants ont été utilisés afin de choisir le meilleur.

4-1 Choix des fluidifiants.

Le choix d'un fluidifiant fait intervenir de nombreux facteurs en plus de la simple teneur en extraits secs. L'expérience montre que l'efficacité d'un fluidifiant dépend autant de la qualité des extraits secs (impuretés, teneurs en sulfonates résiduelles, longueur des chaînes moléculaire...) que de la quantité d'extraits secs (40 à 42% pour les fluidifiants à base de naphthalène, 20 à 22% pour ceux à base de mélamine).

Pour cela, nous avons réalisé cinq bétons dont nous avons mesuré l'affaissement et la résistance à la compression à 7 jours. Dans le premier, nous avons utilisé un fluidifiant à

base de naphthalènes SFA, dans le deuxième et troisième, un fluidifiant à base de résine mélamine SP et une combinaison des deux (SP+SFA) pour les deux derniers bétons.

Les résultats des différents essais que nous avons réalisés sont résumés dans le tableau (5-10).

Essai N°	S	G	g	C	E	SP	SFA	Resistance à 7j (Mpa)	Maniabilité en mm
1	650	870	220	450	0,35	I	1,6%	36,4	14,5
2	650	870	220	450	0,35	3%	/	34,8	16
3	650	870	220	450	0,35	4%	/	35,2	17,2
4	650	870	220	450	0,35	2%	1,6%	36,2	16,5
5	650	870	220	450	0,35	2%	1%	35,7	15,2

Tableau : (5-10) : Optimisation en superplastifiant

Nous avons constaté que le béton réalisé avec la combinaison des deux superplastifiants donne une maniabilité suffisante (en Générale slump >16cm) et une résistance importante à jeune âge.

Ainsi, l'analyse des résultats du tableau (5-10) nous a permis d'opter pour le dosage du 4ème essai, c'est à dire un SP=2% et un SFA = 1.6%.

4-2 Estimation du dosage en fluidifiants

L'expérience montre que l'on obtient, en général, un béton à haute performance lorsque la teneur en extraits secs (exprimée par rapport à la masse du ciment) est comprise entre 0,75 et 1,25 %. Au-delà d'un dosage en extrait sec de 1,25, on commence à observer, dans beaucoup de cas, des retards de prise de 12 à 24 heures et même plus [28].

Nous commençons donc par calculer la quantité des fluidifiants en prenant un dosage en extrait sec de 1 % (0,33 % SFA +0,66% SP). Pour cela on utilise la formule suivante [28]:

$$X = \frac{100.S.C}{s.d_1}$$

X : dosage de fluidifiant dans un mètre cube de béton (l/m³)

C : dosage de ciment. s : teneur en extrait sec

d₁ : densité du fluidifiant. S=100.F/C

F : est la quantité d'extrait sec contenu dans X litres de fluidifiant

On désire fabriquer un béton avec E/C=0,35 en utilisant 157,5 l d'eau de gâchage par mètre cube. Le fluidifiant SFA utilisé a une teneur en extrait sec de 40% et une densité de 1,20. Le dosage en ciment est de 450 Kg/m³.

$$X_1 = 100 \cdot \frac{0,33}{100} \cdot 450 \cdot \frac{1}{40} \cdot \frac{1}{1,20} = 3,09 \text{ litre}$$

Le fluidifiant SP utilisé a une teneur en extrait sec de 20% et une densité de 1,18.

$$X_2 = 100 \cdot \frac{0,66}{100} \cdot 450 \cdot \frac{1}{20} \cdot \frac{1}{1,18} = 12,58 \text{ litres.}$$

Selon Y. Malier [28], pour déterminer la quantité d'eau de gâchage, il faut tenir compte de la quantité de liquide contenue dans le fluidifiant. Celle ci est déterminée comme suit

$$V_{e1} = \frac{100-s}{100} \cdot X_1 \cdot d_1 = \frac{100-40}{100} \cdot 3,09 \cdot 1,20 = 2,22 \text{ litres}$$

$$V_{e2} = \frac{100-20}{100} \cdot 12,58 \cdot 1,18 = 11,87 \text{ litres} \quad V = V_{e1} + V_{e2}$$

$$E = E_i - V_E = 143,4 \text{ litres}$$

E_i : la quantité d'eau calculée à partir du rapport E/C.

V_E : le volume d'eau apporté par les fluidifiants.

Enfin la composition finale retenue pour le béton à granulométrie continue pour différents E/C est résumée dans le tableau (5-11)

G 8/15	g 3/8	S 0/5	C	E	E/C	SP	SFA	Slump (cm)
870	220	650	450	143,4	0,35	14,8	3,7	17,5
870	220	650	450	165,9	0,4	14,8	3,7	20
870	220	650	450	120,9	0,3	14,8	3,7	14,5
870	220	650	1 450	98,4	0,25	14,8 I	3,7	8

Tableau 5-11 : Formule du BHP (Kg/m³)

4-3 Béton à granulométrie discontinue

De même que pour le béton à granulométrie continue, la composition finale du béton à granulométrie discontinue est représentée dans le tableau (5-12).

G 8/15	S 0/5	C	E	E/C	SP	SFA	Slump (cm)
1070	720	450	143.4	0.35	14.84	3.70	18.2

Tableau (5-12): Fonnule du BHP â granulométrie discontinue - Poids en Kg/m3.

CHAPITRE 6

ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

Après avoir arrêté la composition finale du béton, nous allons procéder aux différents essais qui nous permettraient la caractérisation du béton à l'état frais et à l'état durci. Cependant, il est nécessaire de rappeler la procédure suivie par la confection du béton ainsi que celle de la préparation des éprouvettes pour les différents essais.

1-La confection du béton.

Les bétons sont confectionnés par gâchée de 0,05 m³ dans un malaxeur à axe vertical de marque « CONTROLAB ».

Nous donnons dans ce qui suit les différentes étapes suivies pour la confection du béton

- mélange à sec des granulats +ciment pendant 60s
- Ajout de l'eau de gâchage et 1/3 du superplastifiant SFA.
- malaxage pendant 90 s.
- Ajout des 2 /3 restants du superplastifiant SFA plus le superplastifiant SP .
- Malaxage 30 s.
- Remuer le béton à l'aide d'une truelle pour éviter le phénomène de ségrégation.



Fig. 6-1 : Opération de malaxage

2- Essais sur béton frais

Les essais sur béton frais doivent être entrepris après avoir fini l'opération de malaxage. Les essais consistent à mesurer la consistance du béton et sa masse volumique à l'état frais.

Notons que pour contrôler le maintien de l'ouvrabilité, la mesure de la consistance doit se faire toutes les 15 minutes depuis la fm du malaxage.

2-1 Mesure de la consistance

Il s'agit de mesurer l'affaissement du béton frais au cône d'Abrams. Pour ce, le cône d'Abrams est rempli par trois couches de béton frais. Après chaque couche, le béton est tassé à l'aide d'une tige d'acier pointue de 16mm de diamètre à raison de 25 coups. Enfm, on soulève le moule avec précaution et on mesure l'affaissement.



Fig. 6-2 : Essai au cône d'abrams

2-2 Masse volumique du béton frais

La détermination de la masse volumique du béton frais se fait comme suit

- Remplir une éprouvette, de volume V et de masse M_e , de béton frais.
- Araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle.
- Peser l'éprouvette remplie ; soit une masse totale M_t .

La masse volumique du béton frais sera alors :

$$\rho_{b \text{ frais}} = (M_t - M_e) / V$$

3- Mise en place dans les moules et cure du béton

Juste après avoir fini la confection du béton tel qu'il a été vu dans le paragraphe 1, nous commençons l'opération de la mise en place du béton dans les moules et ce comme suit

Nous rappelons qu'avant chaque mise en place du béton dans les moules, ces derniers sont badigeonnés par de l'huile afin de faciliter le démoulage.

- Les moules sont remplis à raison de trois couches. Chaque couche est compactée à l'aide d'un vibreur électrique (placé sur le moule)
- Araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle



Fig. 6-3 : Arasement des éprouvettes

- Les moules ainsi remplis sont couverts d'une bâche de plastique et entreposés aux conditions ambiantes du laboratoire pendant 24h.
- Après les 24h, on procède au démoulage. Les éprouvettes sont pesées et conservées dans l'eau toujours dans les conditions ambiantes du laboratoire et ce jusqu'à la date de l'essai.



Fig. 6-4 : Conservation dans l'eau des éprouvettes

4-Essais sur béton durci

4-1 Masse volumique

Avant d'entamer les essais mécaniques sur le béton durci, nous avons pris la précaution de mesurer sa masse volumique.

$$\rho_{b \text{ durci}} = M_{pb} / V$$

où M_{pb} : masse de l'éprouvette de béton durci.

V : son volume

4-2 Résistance à la compression

Il faut signaler que des essais de la résistance à la compression seront effectués pour deux différents types de bétons, en l'occurrence un béton à granulométrie continue et un autre à granulométrie discontinue.

Commençons par donner le nombre et les différents types d'éprouvettes qui seront testées en compression :

- 18 éprouvettes (16*32) d'un seul type de béton ($E/C=0,35$) pour mesurer la résistance en compression à 1,3,7,14,28,56 jours.
- 18 éprouvettes (16*32) pour l'ensemble des bétons, pour mesurer la résistance à la compression à 28 et 56 jours.
- 18 éprouvettes cubiques (10*10) d'un seul type de béton pour mesurer la résistance à la compression à 1,3,7,14,28,56 jours.

- 12 éprouvettes (16*32) pour l'ensemble des bétons à granulométrie discontinue pour mesurer la résistance à la compression

Il faut rappeler que les surfaces libres sont rarement planes (ou lisses) et entraînent un phénomène de concentration de contraintes lors de l'essai de compression. Ainsi , il serait nécessaire de remédier à ce problème par une opération de surfaçage.

En général, on utilise du surfaçage au soufre. Cependant, des recherches réalisées par De Larrard montrent que le surfaçage au soufre n'est pas bien adapté pour les bétons à hautes performances . A ce titre, une solution a été apportée et consiste à envisager un lit de sable sur chaque surface de l'éprouvette et connue sous le nom de « boîte à sable ».

Pour notre étude, nous avons utilisé un surfaçage à soufre car c'est l'unique moyen dont dispose le Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (LNHC).

L'opération de surfaçage au soufre consiste à :

- Préparer une composition renfermant deux volumes de soufre et un volume de sable fin (<5mm)
- Apporter le mélange à une certaine température jusqu'à fusion, puis l'étaler sur la plaquette de l'appareil de surfaçage . Poser l'éprouvette perpendiculairement sur la plaquette et après quelques minutes, soulever pour obtenir une surface très lisse



Fig. 6-5 : Surfaçage des éprouvettes

Notons que seules les éprouvettes cylindriques ont connu ce surfaçage.

Les bétons seront confectionnés au laboratoire de structure de l'institut de L'IGC.

Les écrasements seront réalisés au Laboratoire Nationale de l'Habitat et de la construction (LNHC), sur une presse hydraulique de marque « TONIPAC », de capacité 1500 KN et d'une vitesse de chargement réglable

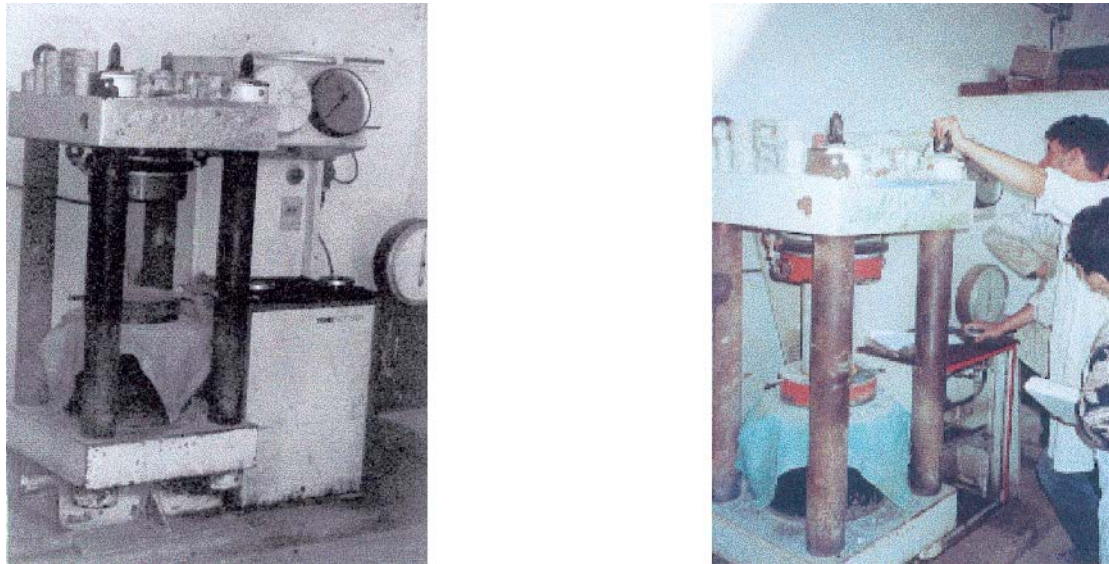


Fig. 6-6 : Essai d'écrasement

La résistance à la compression (exprimée en Mpa) correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante

$$\rho_c = P/S \quad \text{avec } P : \text{ la charge de rupture}$$

S : est la surface de la section droite de l'éprouvette

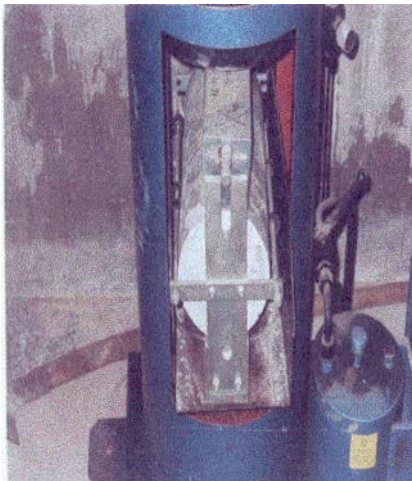
4-3 Resistance à la traction.

Il faut signaler que seul le béton à granulométrie continue sera sujet à ce type d'essai. Les essais seront effectués par fendage sur des éprouvettes cylindriques (16*32). Douze éprouvettes (16*32) seront testées pour un seul type de béton (E/C=0,35).

Les essais seront réalisés sur la presse de compression citée ci- dessus.

deux réglettes en contre plaqué de 5mm d'épaisseur et de 200mm de largeur sont placées entre les génératrices supérieures et inférieures de l'éprouvette et les plateaux de la presse afin d'assurer le bon contact.

La résistance à la traction par fendage est calculée d'après la formule suivante



$$\sigma = 2P / \pi \cdot D \cdot L$$

avec

P = charge de rupture

D = diamètre de l'éprouvette

L = longueur de l'éprouvette

Fig 6-7 : Essai de traction par fendage

4-4 Module d'élasticité

Le module d'élasticité statique en compression est déterminé graphiquement, en exploitant la courbe contrainte - déformation.. Il se traduit par la valeur de la pente à l'origine de cette courbe.

Pour la détermination du déplacement, un comparateur de précision $2 \cdot 10^{-3}$ est utilisé.

Ce comparateur est fixé sur un pied muni d'un aimant. Une extrémité du comparateur doit coïncider avec le plateau supérieur de la presse juste au moment où la compression commence tandis que l'aimant est fixé sur le plateau immobile (inférieur)



Fig. 6-8 : Mesure du module d'élasticité