

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



جامعة هواري بومدين للعلوم والتكنولوجيا

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
HOUARI BOUMEDIENE

Faculté de Génie Civil et de Génie Mécaniques  
Département de Génie Civil

**MEMOIRE**

Présenté par

M. KAROUCHE Abdelhamid

*Ingénieur d'état en génie civil de l'ENP*

En vue d'obtenir le diplôme

MAGISTER EN GENIE CIVIL

**Option : Construction**

**Thème**

***BETON A HAUTES PERFORMANCES : -  
CARACTERISATION DU MATERIAU AVEC  
REFERENCE PARTICULIERE AUX  
DEFORMATIONS DIFFEREES***

Soutenu le : 13/10/2001 devant le jury composé de

Président : M. Farid KAOUA..... Maître de conférence, USTHB

Rapporteur : M. Mohamed CHEMROUK.....Maître de conférence, USTHB

Examineurs : M. Ali BENYAHIA .....Maître de conférence, USTHB


M. Youcef KAHILA .....Maître de conférence, EPAU

M<sup>me</sup> Fatoum KHARCHI.....Maître de conférence, USTHB

M<sup>me</sup> Ratiba KETTAB.....Chargée de cours, ENP

M. Nadjib OUDJIT.....Chargé de cours, USTHB

B.P.32 -EL ALIA-16111 BAB EZZOUAR ALGER



## Dédicace

Je dédie ce travail à :

- La source de l'affection, mon unique amour ma mère pour ses encouragements.
  - A mon père avec toute la reconnaissance pour les sacrifices consentis à mon égard.
- A mon frère et ma belle sœur pour leurs aides précieuses.
- A mes sœurs et mes beaux-frères pour tous ce qu'ils ont fait pour moi
- A mes neveux et mes nièces : Hatem, Chaima, Naila, Linda, Yacine, Bidjed, Imad et Haithem.
  - A ma grande famille
- A mes amis : Hakou, Fateh, Abdelouahab, Hakim, Boubaker, Sihem, Kafia, Cicine, Salima et Amel.
  - A A/Aziz, Dalila et Radja pour leurs aides
- A mes collègues : Karima, Nadia et de loin Abed.
- A tous mes enseignants de l'école primaire jusqu'à l'université.

A tous ceux qui veillent pour que l'Algérie reste debout.



HAMOUDI

## Remerciements

Aucun mot, aucune expression ne suffiront pour traduire notre immense gratitude à notre promoteur, Mr M.CHEMROUK ,Maître de conférence à l'USTHB, pour son aide, ses conseils et sa compréhension. Qu'il veuille bien accepter nos remerciements les plus sincères.

Nous remercions Mr Farid KAOUA, Maître de conférence à l'USTHB, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de présider notre jury de thèse et pour ses encouragements à tous les étudiant de la PG.

Nous remercions doublement, Mr A. BENYAHIA, Maître de conférence à l'USTHB, Mr. Y. KAHILA, Maître de conférence l'EPAU et M<sup>me</sup> F. KHARCHI, Maître de conférence à l'USTHB, premièrement pour l'honneur qu'ils nous font d'être membres du jury de la thèse. Deuxièmement, pour leurs nombreux travaux de recherche dans ce domaine qui sont pour nous une référence incontournable.

Nous remercions également M<sup>me</sup> KATAB, Chargée de cours à l'ENP et Mr M. N. OUDJIT, Chargé de cours à l'USTHB, pour l'honneur qu'ils nous font d'être membres du jury de la thèse, et pour leurs nombreux travaux de recherche qui ont été d'un apport certain à la qualité de nos connaissances.

Nous tenons aussi à remercier Mr. R. OUMAZIZ Directeur de CNERIB, Mr. KELAHNEMEUR directeur de LNHC, les travailleurs des laboratoire d'analyse de la cimenterie de Meftah ainsi que le chef de laboratoire de contrôle de la SAPTA, pour leur aide précieuse.

Nous n'oublions pas de remercier M. NECHNECH, pour sa disponibilité à nous aider.

Nous remercions tous les enseignants de la PG de L'USTHB sans exception pour leurs patience et servitude. Ils ont contribué à nous transmettre leur savoir pour assurer notre formation.

Enfin, une grande reconnaissance et un grand merci sont adressés aux personnel de la bibliothèque et du centre de calcul et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre projet. Leur soutien nous a été bénéfique pour la réalisation de ce travail, notamment, M. A. FERTIKH et M<sup>me</sup> M. BOULMELH, BOUHOUS MESAOUUD, KAMEL.

# SOMMAIRE

## INTRODUCTION

I-	Préambule	1
II-	Problématique	3
III-	Plan de travail	4

## CHPITRE I : COMPOSITION DES BETONS ORDINAIRES

I-	Introduction	5
II-	Paramètres influants sur la qualité du béton	5
	<i>II-1- Compacité et rapport C/E</i>	5
	<i>II-2- Dimensions maximales des granulats - Effet de paroi</i>	6
	<i>II-3- Dosage en eau et en ciment</i>	7
	<i>II-4- Autre facteurs influants sur la qualité du béton</i>	7
III-	Rappel des méthodes principales de composition du béton	8
	<i>III-1- Méthode de BOLONEY</i>	8
	<i>III-2- Méthode d'ABRAMS</i>	8
	<i>III-3- Méthode de VALLETTE</i>	8
	<i>III-4- Méthode de FAURY</i>	8
	<i>III-5- Méthode du C.E.B.T.P</i>	11
	<i>III-6- Autres méthodes de composition des bétons</i>	11

## CHAPITRE II : BETONS A HAUTES PERFORMANCES

I-	Introduction	12
	<i>I-1- Définition</i>	12
	<i>I-2- Historique</i>	13
II	Composition des bétons a hautes performances	13
	<i>II-1- Choix des matériaux</i>	13
	<i>II-2- Proportion des matériaux</i>	20

## Chapitre III : PROPRIETES DES BETONS A HAUTES PERFORMANCES

I-	Propriétés à l'état frais et mise en œuvre	25
	<i>I-1- L'ouvrabilité – maniabilité</i>	25
	<i>I-2 Pompabilité,</i>	25
	<i>I-3 Ségrégation</i>	25
	<i>I-4 Ressuage</i>	25
	<i>I-5 Mise en œuvre</i>	26
II-	Propriétés mécaniques BHP	26
	<i>II-1- La prise et le durcissement</i>	26

<i>II-2- Déformations libres</i>	26
<i>II-3- La microstructure, porosité et compacité</i>	27
<i>II-4- Les déformations différées sous charge</i>	27
<i>II-5- Résistance en compression</i>	28
<i>II-6- Résistance à la traction fendage</i>	31
<i>II-7- Résistance à la traction par flexion</i>	31
<i>II-8- Courbe contrainte déformation</i>	32
<i>II-9- Module d'élasticité</i>	33
<i>II-10 Coefficient de POISSON <math>\nu</math></i>	33

## CHAPITRE IV : DESCRIPTION DE L'HYDRATATION

I- L'hydratation du ciment et processus de formation de la pâte du ciment	35
<i>I-1. Hydratation des silicates</i>	35
<i>I-2. Hydratation des aluminates</i>	36
<i>I-3 Déroulement cinétique du processus</i>	36
II- Comportement de la structure de la pâte de ciment	37
<i>II-1. Les CSH</i>	37
<i>II-2. La porosité</i>	37
<i>II-3. Etat de l'eau dans la pâte de ciment durcie</i>	37
III- Caractérisation de l'évolution du matériau : Le degré d'hydratation	38
<i>III-1. Définition</i>	38
<i>III-2. Détermination du degré d'hydratation</i>	38
IV- Evolution des propriétés mécaniques	38
V- Notion de maturité	39

## CHAPITRE V : RETRAIT

I- Introduction,	40
II- Les facteurs influençant le retrait	42
III- Le retrait des BHP	46
<i>II-1. Le retrait plastique</i>	46
<i>II-2. Le retrait thermique</i>	46
<i>II-3. Le retrait endogène</i>	47
IV- Calcul du retrait par homogénéisation	49
<i>IV-1 Modèle tri sphère</i>	49
<i>IV-2 Modèle empirique pour le retrait de la pâte de ciment</i>	51
<i>IV-3 La variation de l'amplitude finale du retrait du béton en fonction de la Formulation</i>	51

## CHAPITRE VI : FLUAGE

I- Concepts fondamentaux	55
--------------------------	----

I-1- Définition	56
II- Facteurs influençant le fluage de béton	62
II-1- Estimation du fluage- CEB-FIP recommandations	63
III- Le fluage des BHP	64
III-1- Fluage propre des BHP,	64
III-2- Fluage de dessiccation des BHP	65
III-3- Modèle de fluage prenant en compte la composition du matériau,	66

## Chapitre VII : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET FORMULATION DES BETONS

I- Introduction	67
II- Matériaux	67
II-1- Granulats	67
II-2- Ciment	72
II-3- Les fluidifiants	74
II-4- Eau de gâchage	75
III- Matériels utilisés,	76
IV- Dosage des matériaux,	76
IV-1- Paramètres de formulation retenus	76
III-2- Formulation du béton	77
IV-2- Récapitulatif	81

## Chapitre VIII : PROGRAMME D'ESSAIS SUR BETON DURCI

I- Introduction	83
II- Propriétés mécaniques	83
II-1- Programme d'essai	83
II-2- Confection du béton	84
II-3- Cycle de malaxage	84
II-4- Démoulage	84
II-5- Cure du béton	85
II-6- Surfaçage des éprouvettes	85
II-7- Résistance à la compression	85
II-8- Résistance à la traction par fendage	85
II-9- Module d'élasticité	85
II-10- Courbe contrainte déformation	85
III- Le retrait et fluage	87
III-1- Objectif	87
III-2- Programme d'essais	87
III-3- Dimensions	88
III-4- Ferrailage	89
III-5- Coulage des poutres	89
III-6- Décoffrage des poutres	90

III-7- <i>Appareil d'appuis</i>	90
III-8- <i>Type de chargement</i>	90
III-9 <i>Mesure et appareils de mesure</i>	90
III-10- <i>Dispositif de chargement et emplacement des comparateurs</i>	91
III-11- <i>Flèche instantanée</i>	92
<b>Chapitre IX : RESULTATS ET INTERPRETATIONS :</b>	
<b>PROPRIETES DES BETONS</b>	
I- Propriétés des bétons frais	93
I-1- <i>Introduction</i>	93
I-2- <i>Affaissement du béton et maintien de l'ouvrabilité</i>	94
II- Propriétés du béton durci	95
II-1 <i>Résistance en compression simple</i>	95
II-2 <i>Résistance à la traction</i>	98
III- Déformation instantanées	100
III-1 <i>Courbe contraintes-déformations des bétons à 7,14 et 28 jours</i>	103
III-2 <i>Module d'élasticité</i>	100
III-2 <i>Module d'élasticité</i>	103
<b>Chapitre X : RESULTATS ET INTERPRETATIONS</b>	
<b>DEFORMATIONS DIFFEREES</b>	
I- Introduction	106
II- Retrait sur éprouvettes	106
II-1 <i>Introduction</i>	106
II-2 <i>Essai</i>	107
II-3 <i>Conclusion</i>	108
III- Fluage et retrait des éléments longs	109
III-1 <i>Introduction</i>	109
III-2 <i>Essai</i>	110
III-3 <i>Retrait des poutres</i>	110
III-3 <i>Fluage des poutres</i>	112
<b>CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS</b>	116

## TABLE DES TABLEAUX

- Tableau1-1** : Les valeurs de D, 7
- Tableau1-2** : Les valeurs de coefficient A, 10
- Tableau1-3** : Valeurs de k, 10
- Tableau2-1** : Classification des bétons de construction, 13
- Tableau2-2** : Composition et résistance des minis bétons I et II, 15
- Tableau2-3** : Dosage des fluidifiants en fonction de celui de fumée de silice, 23
- Tableau3-1** : Valeurs de k, 29
- Tableau3-2** : Résistance moyenne à la compression des différentes formes du même Béton, 29.
- Tableau3-3** : Résistance en compression de 8 échantillons, 30
- Tableau5-1** : Le retrait en fonctions de dosage de ciment, 45
- Tableau6-1** : Evolution du fluage dans le temps, 62
- Tableau6-2** : Le fluage en fonction de la composition, 62
- Tableau6-3** : Valeurs des coefficients de fluage  $K_{fl}$  pour différents BHP chargés à 28 Jours, 65
- Tableau7-1** : Analyse granulométrique des granulats, 69
- Tableau7-2** : Caractéristiques initiales des granulats, 70
- Tableau7-3** : Les caractéristiques du sable après lavage et tamisage, 70
- Tableau7-4** : Caractéristiques du ciment, 73
- Tableau7-5** : Caractéristique des fluidifiants, 75
- Tableau7-5** : Le dosage en granulats, 77
- Tableau7-6** : Composition de béton après optimisation, 78
- Tableau7-7** : Résistances et slumps des bétons selon l'adjuvant utilisé, 79
- Tableau7-8** : Evolution de la maniabilité en fonction de E/C, 80
- Tableau7-9** : Composition finale du BHP, 81
- Tableau7-10** : Composition des bétons, 82
- Tableau8-1** : Essais du fluage et du retrait sur poutres, 88
- Tableau9-1** : Résistances à la compression, 96.
- Tableau9-2** : Rapport des résistances en compression, 96
- Tableau9-3** : Résistances en traction, 98
- Tableau9-4** : Rapport des résistances en compression et celles en traction, 99

**Tableau9-5** : Les modules d'élasticité, 100

**Tableau10-1** : Retrait des éprouvettes, 108

**Tableau 10-2** : Retrait des poutres, 111

**Tableau 10-3** : Fluage des poutres, 113

## **TABLE DES FIGURES**

**Fig.1-1** : Tracé de la courbe granulométrique de référence, 9

**Fig.2-1** : Cône de MARCH, 21

**Fig.2-2** : Essai d'écoulement, 21

**Fig.2-3** : Temps d'écoulement =fonction(temps d'attente), 22

**Fig.2-4** : Application de la méthode BARON LESAGE pour la détermination de la proportion optimale du squelette, 23

**Fig.3-1** : Gain de résistance en fonction du temps, 28

**Fig.3-2** : Types de ruptures rencontrées lors des essais d'écrasement, 30

**Fig.3-3** : Diagramme complet contrainte déformation pour divers bétons, 32

**Fig.3-4** : Contrainte axiale en fonction de déformations axiales et déformations latérales, 32

**Fig.5-1** : Le rapport  $\varepsilon_b/\varepsilon_p$  en fonction des % en volume des agrégats, 43

**Fig.5-2** : Retrait en fonction du module d'élasticité, 44

**Fig.5-3** : Effects of type of aggregates on shrinkage, 44

**Fig.5-4** : Evolution de la quantité relative d'eau liée en fonction du temps pour différentes valeurs de E/C, 47

**Fig.5-5** : Schéma de la cellule élémentaire de modèle tri sphère, 49

**Fig.5-6** : Evolution de rapport du retrait du béton à celui de la pâte,  $\varepsilon_{bt}/\varepsilon_{pat}$ , en fonction de la concentration granulaire, et pour différents  $E_g/E_d$  ( $g^*=87\%$ ,  $E_d=5000\text{Mpa}$ ), 52

**Fig.5-7** : Le retrait en fonction de la concentration granulaire, 52

**Fig.5-8** : Evolution du retrait du béton en fonction du rapport e/c, pour différentes valeurs de S/C. Simulation réalisée pour  $g=0.71$ , 53

**Fig.6-1** : Courbe déformation-temps typique de béton, 56

- Fig.6-2** : Accroissement des contraintes, 59
- Fig.6-3** : Retour de fluage, 59
- Fig.7-1** : Courbe granulométrique et courbe de référence de FAURY, 71
- Fig.7-2** : Optimisation de squelette, 78
- Fig.8-1** : Dispositif de mesure des déformations axiales, 86
- Fig.8-2** : Coupe transversale, 89
- Fig.8-3** : Coupe longitudinale, 89
- Fig.8-4** : Fluage sur éprouvette, 91
- Fig.8-5** : Emplacement des comparateurs, 91
- Fig.9-1** : Evolution de l'affaissement dans le temps, 94
- Fig.9-2** : Dispositif permettant la mesure de la traction par fendage, 97
- Fig.9-3** : Evolution des contraintes en fonction de l'âge, 98
- Fig.9-4** : Evolution des contraintes de traction des bétons, 99
- Fig.9-6** : Comportement des bétons à 7 jours, 104
- Fig.9-7** : Comportement des bétons à 14 jours, 104
- Fig.9-8** : Comportement des bétons à 28, 84, 105
- Fig.9-5** : Evolution de module d'élasticité en fonction de l'âge, 106
- Fig.10-1** : Déformation du retrait, 107
- Fig.10-2** : Evolution du retrait des éprouvettes, 108
- Fig.10-3** : Mesure de la flèche due au retrait, 110
- Fig.10-4** : Retrait des poutres, 111
- Fig.10-5** : Mesure de la flèche due au fluage, 113
- Fig.10-6** : Fluage en fonction de l'âge, 114

ملخص :

الدراسة المقدمة في هذا العمل تهدف إلى توضيح و تقييم الخرسانات ذات المواصفات العالية أنها مواد للبناء، خاصة من ناحية التثوهات ذات المدى البعيد .

على هذا الأساس الخصائص الفيزيوميكانيكية و التثوهات الوقتية و كذلك البعيدة المدى قد درست من خلال تجارب مخبرية على عينات من الخرسانة العادية و الخرسانة ذات المواصفات العالية، هذان النوعان لهما نفس الهيكل الحصري

الدراسة التثبئية لهذين النوعين من الخرسانة و المتمركزة على التجارب تخص الحالة السائلة و الحالة الصلبة أيضا، و هذا لمدة تفوق السنة أشهر لقياس التثوهات بعيدة المدى

النتائج التجريبية توضح منافع الخرسانة ذات المواصفات العالية على المدى القصير و البعيد كذلك، و هذا من حيث المقاومة و الديمومة أي جودة الإنشاء، و بذلك ترفع الفائدة الاقتصادية لهذه المادة و التي أصبحت موضوع الساعة ، خاصة مع تطور و توفر الإضافات المميعة في سوق الإنشاءات

**Résumé :**

L'étude présentée dans ce travail a pour objectif la mise en évidence et la valorisation des bétons à hautes performances comme matériaux de construction particulièrement du point de vue déformations différées (retrait et fluage). Dans ce sens, les propriétés physico-mécaniques et les déformations aussi bien instantanées qu'à long terme sont étudiées à partir d'essais de laboratoire sur des spécimens faits en béton ordinaire et en béton à haute performance ; les deux types de béton ayant le même squelette granulaire.

L'étude comparative, basée sur l'expérimentation concerne aussi bien l'état frais que l'état durci des deux types de béton et s'est échelonnée sur plus de six mois pour les mesures de retrait et de fluage.

Les résultats expérimentaux mettent en évidence l'avantage des bétons à haute performance aussi bien à court terme qu'à long terme du point de vu résistance et durabilité et donc qualité constructive et soulèvent ainsi l'intérêt économique de ce matériau devenu de plus en plus d'actualité à nos jours surtout avec le développement et la disponibilité des adjuvants superplastifiants dans le marché de la construction.

**Synopsis :**

The study presented in this work aims at placing high performance concrete in a prominent position and valuing it as a building material, particularly from the point of view long-term straining such as shrinkage and creep. In this sense, the physical and mechanical properties together with the short term as well as long term strains have been studied from laboratory tests carried out on specimens made of ordinary concrete and high performance concrete; the two types of concrete having the same granular skeleton.

The comparative study, based on experiments, concerned the fresh state as well as the hardened state of two types of concrete and speed over more than six month for shrinkage and creep measurements.

The experimental results show clearly the advantage of high performance concerts both in a shorter term and in a longer term from the point of view strength as well as durability and hence constructive qualities and stress thus on economical advantage of such a material becoming more and more a construction matter of interest at our days particularly with the development and the availability of the superplastizers in the construction market.

## **INTRODUCTION**

---

### ***I- Préambule :***

Les ingénieurs de structure se rendent compte de l'intérêt économique des bétons à hautes performances (de résistance caractéristique à 28 jours compris entre 50 et 100 MPa) dans les domaines de plus en plus nombreux : immeubles de grande hauteur, pont, plates-formes offshore, éléments préfabriqués tels que les poutres à fils adhérent, etc. c'est pourquoi ces matériaux seront de plus en plus utilisés dans les usines et sur les chantiers.

Dans des séries de publications, des chercheurs ont montré que pour améliorer les qualités d'un béton tant du point de vue résistance que du point de vue durabilité, il faut :

- Diminuer autant que possible le rapport E/C du béton ; pour y arriver, on diminue la quantité d'eau de gâchage et on la compense par des fluidifiants du type superplastifiants.
- Sélectionner en un lieu donné le couple liant/fluidifiant le plus efficace, tant du point de vue rhéologique (perte d'affaissement) que de point de vue résistance mécanique.
- Dénicher les granulats suffisamment pour offrir une bonne adhérence afin de retarder le plus possible l'apparition de fissures catastrophiques, au sens de la mécanique de la rupture, lorsque le béton est soumis à des efforts croissants.

A nos jours le béton peut être très performant, des résistances dépassent 150 MPa ont été récemment atteintes. Ceci a été possible grâce à la réduction des vides dans la microstructure

du matériau ; ces vides sont souvent remplis d'eau en surplus dans un premier temps, et qui s'évapore par la suite sous les conditions climatiques. Cette densification du matériau jusqu'à rendre le béton imperméable en utilisant les ultrafines, élimine les risques d'attaques chimiques du béton et des aciers noyés à l'intérieur par des corps extérieurs.

Le béton est une matière en perpétuelle évolution. Il est sensible aux conditions extérieures physiques, chimiques et à toute autre intervention qui influence ses comportements ultérieurs. Le liant hydraulique subit une évolution chimique qui se poursuit dans le temps. Cela nous ramène à dire que l'âge et l'histoire du béton joue un rôle considérable aussi bien physique que chimique dans ces propriétés.

Le retrait et le fluage sont deux phénomènes physiques de première importance. Ils conditionnent à long terme l'aptitude au service des ouvrages qui peut devenir critique par les déformations importantes ou par les fissurations exagérées affectant ainsi la durabilité du matériau composé (béton + acier) et donc la structure.

Le fluage de la pâte de ciment résulte de déplacement des cristaux d'hydrates les uns par rapport aux autres, lorsque ces cristaux se trouvent soumis à des contraintes<sup>6,10,11</sup>.

D'autre part, il existe une pellicule d'eau adsorbée sur le squelette d'hydrates, en équilibre avec la pression partielle de la vapeur d'eau contenu dans l'espace des pores. La tension superficielle exercée par cette pellicule d'eau déforme le squelette. Mais lorsque la quantité d'eau adsorbée diminue, les contraintes augmentent d'où le retrait macroscopique qui dans le cas du béton, crée non seulement des déformations globales, mais aussi des auto-contraintes.

L'origine du départ d'eau peut être interne<sup>6</sup> telle la consommation par hydratation du liant ; on parle alors de retrait d'auto dessiccation ou externe telle la diminution de la vapeur d'eau par mise en équilibre avec le milieu ; c'est le retrait de séchage.

Deux mécanismes physiques sont donc mis en évidence ces deux mécanismes sont conditionnés par trois causes : le chargement, l'hydratation et le séchage. L'idéal serait de mesurer l'amplitude de chaque mécanisme provoqué par chaque cause élémentaire (en absence de deux autres).

C'est ainsi que sur des poutres en béton armé, le fluage se manifestera par le développement de flèche différée, et sur des poteaux (immeubles de grandes hauteurs) par des tassements

différés. Des désordres structuraux peuvent apparaître sous forme de fissures en cas de mauvaise évaluation de ces phénomènes (flèches trop importantes, tassements différentiels).

Il est à rappeler que le phénomène de fluage du béton a été mis en évidence pour la première fois en France par FREYSSINET en 1912. Ce n'est que bien plus tard, en 1943, que MAC HENRY proposa d'adopter le principe de superposition pour rendre compte des phénomènes observés.

## **II *Problématique :***

Ce travail a été entrepris pour étudier les propriétés, en particulier, déformations différées du béton à hautes performances, évaluées à partir d'essais de laboratoire sur éprouvettes (modèles réduits) et les comparer à celles du béton ordinaire. Pour cela deux compositions de béton ont été considérées, une composition avec E/C (eau/ciment) de 0.5 pour le béton ordinaire et une autre avec E/C de 0.35 pour le béton à hautes performances.

L'analyse comparative, menée à partir d'une large panoplie de méthodes expérimentales porte à la fois sur les propriétés du béton à l'état frais (maniabilité) et à l'état durci (résistance et module d'élasticité), sur le retrait des éprouvettes, ainsi que le retrait et le fluage à partir de poutres soumises à un autre mode de chargement statique à longue durée qui est la flexion.

Pour atteindre cet objectif nous avons commencé par la formulation des bétons (BO, BHP), ces derniers possèdent les mêmes proportions des granulats donc même squelette granulaire mais en diminuant la quantité d'eau et en ajoutant des superplastifiants pour les BHP.

La formulation de ces bétons est faite à partir des matériaux locaux. Pour sélectionner ces matériaux, une large investigation a été menée au niveau des carrières, des cimenteries et même dans des entreprises de construction, afin de pouvoir utiliser des matériaux de meilleures caractéristiques et qui peuvent être utilisés dans la formulation des BHP.

Pour ce travail les recommandations données dans la littérature ont été suivies et des essais préliminaires ont été entrepris quand cela était nécessaire

**III- Plan de travail :**

Afin de réaliser cette étude nous avons adopté le plan suivant :

1. Une introduction générale pour mettre en évidence l'importance de l'amélioration des qualités du béton aussi bien à court terme qu'à long terme.
2. Une synthèse bibliographique où dans un premier lieu nous présentons les différentes méthodes des compositions des bétons ordinaires, des caractéristiques des matériaux entrant dans la formulation des BHP, puis nous rappelons les propriétés mécaniques de ces matériaux selon la littérature. En dernier lieu nous essayons d'expliquer les phénomènes de retrait et de fluage en se référant à des résultats théoriques et expérimentaux existant dans la littérature. Puis nous abordons de façon générale l'hydratation du ciment.
3. Une étude expérimentale où nous décrivons le programme des essais et la démarche suivie pour la formulation des bétons, puis nous interprétons les résultats des essais portant sur les propriétés mécaniques, et les déformations différées (fluage et retrait).
4. A partir de la synthèse bibliographique et à partir de l'expérimentation menée dans ce travail, une conclusion est donnée quant à l'avantage des BHP vis-à-vis des déformations différées ainsi que des recommandations pour poursuivre ce travail.

## Chapitre I :

### COMPOSITION DES BETONS ORDINAIRES

---

#### *I- Introduction :*

Le but d'une composition est d'aboutir à définir le mélange optimal de granulats, de ciment et d'eau afin de réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées.

En réalité une étude théorique ne conduit qu'à une approche du problème, par contre la solution définitive n'est obtenue qu'à partir de la réalisation d'essais préliminaires.

Les deux critères fondamentaux sur lesquels se base toute formulation sont :

- La résistance.
- L'ouvrabilité (facilité de mise en œuvre).

Avant de passer en revue les principales méthodes utilisées, il y a lieu d'examiner les principaux facteurs agissant sur la résistance et l'ouvrabilité des bétons :

#### *II- Paramètres influants sur la qualité du béton :*

##### *II-1- Compacité et rapport C/E :*

- La compacité  $\gamma$  d'un béton est le volume occupé par la matière de solide (ciment + granulats) dans un mètre cube du béton frais.
- Rapport E/C est le rapport entre le poids de l'eau de gâchage et le poids de ciment par unité de volume de béton.

FERRET et BOLOMEY<sup>1,17,34</sup> ont montré que la résistance du béton croît avec la compacité et avec le rapport C/E. Néanmoins, une augmentation de C/E diminue l'ouvrabilité du béton.

BOLOMEY<sup>1,7,34</sup> propose la relation suivante pour le calcul de la résistance du béton en compression.

$$\sigma' = K \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (1.1)$$

K est un coefficient fonction de la nature et de la classe vraie du ciment, de la qualité des granulats et des procédés de la mise en œuvre.

K est donné par la formule :

$$k = G \cdot \sigma'_c$$

G est un coefficient qui prend en considération la qualité des granulats, varie de 0.35 à 0.65.

$\sigma'_c$  est la classe vraie du ciment à 28 jours.

La résistance  $\sigma'$  ainsi calculée est la résistance à la compression du béton à 28 jours.

### **II-2- Dimensions maximales des granulats - Effet de paroi :**

a) *Effet de paroi* : l'effet de paroi se définit comme étant la plus au moins grande difficulté qu'il y a à bien remplir le moule dans lequel les surface en contact avec le béton (armatures, gaines) sont plus au moins importante par rapport au volume.

b) *Rayon moyen «r» d'un ferrailage* : on définit le rayon moyen d'un ferrailage

- Pour une maille :  $r = \frac{a \cdot b}{2(a + b)}$

- Pour deux barres :  $r = \frac{e}{2}$

L'effet de paroi se traduit par l'enrichissement en mortier (sable + ciment) du béton, au contact ou à proximité d'une paroi (coffrage ou armature).

Le rapport  $D/R$ <sup>1</sup> caractérise l'effet de paroi du moule.

Où :

D: Dimension maximale des granulats.

$R = V/S$  : rayon moyen de moule

Où :

S: la surface totale des parois (coffrage + gaines + ferrailage).

V = Volume du moule.

En pratique, pour la détermination de R, le volume de moule à considérer est celui de ses parties les plus ferrillées.

Pour éviter l'appauvrissement en mortier du béton (effet de paroi) et les difficultés de remplissages des moules augmentant avec les graviers (grosseur des granulats), l'application des règles concernant le choix de la dimension des granulats sont prises en compte<sup>1</sup>.

Le tableau (1-1) donne les valeurs des diamètres maximaux des granulats en fonction des caractéristiques des pièces à bétonner.

Caractéristiques de la pièce à bétonner	Granulats roulés	Granulats concassés
E: épaisseur entre armatures horizontales	$D \leq 0.9E$	$D \leq 0.8 E$
C: enrobage	$D \leq 0.8C$	$D \leq 0.7C$
r= rayon moyen d'un ferrailage	$D \leq 1.8r$	$D \leq 1.6r$
$h_m$ : épaisseur maximale de la pièce à bétonner	$D \leq \frac{h_m}{4}$	$D \leq \frac{h_m}{4}$
R: rayon moyen de moule	$D \leq 1.2R$	$D \leq R$

**Tableau1-1: Les valeurs de D**

### II-3- Dosage en eau et en ciment :

L'augmentation de la quantité d'eau augmente l'ouvrabilité des bétons. Mais, elle diminue les résistances inversement au ciment. De ce fait, le choix des quantités de ces deux constituants résultent plus d'un compromis que d'un résultat de calcul exact.

*Dosage minimal de ciment* : pour des considérations de résistance minimale et de durabilité à long terme, un dosage minimum est souvent exigé, tel que <sup>1,18</sup>.

Le BA60 recommande :  $C_{\min} = \frac{500}{\sqrt[5]{D}}$

La norme NF18 305 :  $C_{\min} = \frac{500 + B}{\sqrt[5]{D}}$

B: résistance garantie du ciment à 28 jours.

### II-4- Autre facteurs influants sur la qualité du béton :

#### II-4-1- La granulométrie des sables :

Son influence est caractérisée par le module de finesse  $M_f$ <sup>18</sup>.

#### II-4-2- Le rapport Gravier/Sable :

Quant G/S augmente, la résistance augmente (pour des bétons courant G/S est inférieur à 2.2)

Une granulométrie continue améliore l'ouvrabilité alors que dans le cas de discontinuité, l'ouvrabilité est affaiblie pour des résistances plus élevées<sup>1</sup>.

#### **II-4-3- Age du béton :**

La résistance du béton croît avec l'âge du béton particulièrement quand une bonne cure est assurée à son jeune âge. Ceci est reflété dans l'expression donnant sa résistance à j jours<sup>1</sup>:

$$f_{cj} = 0.685 f_{c28} \log(j + 1) \quad (1.2)$$

### **III- Rappel des méthodes principales de composition du béton :**

#### **III-1- Méthode de BOLOMEY<sup>1,34</sup> :**

On doit s'efforcer avec les granulats dont on dispose à réaliser une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe soit aussi proche que possible de la courbe de référence définie par BOLOMEY (allure parabolique).

La relation de base est :

$$P = A + (100 - A) \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (1.4)$$

P: est le pourcentage en poids de granulats passant à travers la passoire de diamètre d.

D: est la dimension maximale des granulats en "mm".

A: est un coefficient variant de 8 à 16. Sa valeur est d'autant plus élevée que le dosage en ciment est grand. Les bétons obtenus par cette méthode sont riches en sable et assez plastique.

#### **III-2- Méthode d'ABRAMS<sup>34</sup> :**

Elle est basée sur le module de finesse  $m_f$  global. En tenant en compte des modules de finesse des divers types de granulats utilisés, ABRAMS définit des règles de mélange.

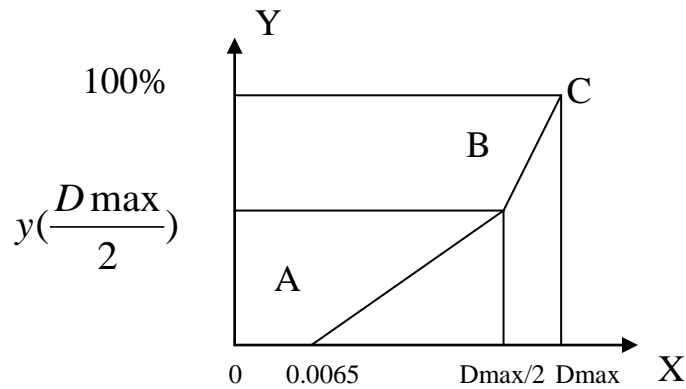
#### **III-3- Méthode de VALLETTE<sup>1</sup> :**

Il s'agit de déterminer à partir des différentes mesures, les dosages des divers granulats conduisant au meilleur béton, c'est à dire une composition contenant le moins de vide possible.

#### **III-4- Méthode de FAURY<sup>1,20,34</sup> :**

Elle est la plus utilisée actuellement. En se basant sur la méthode de BOLOMEY, FAURY tient compte des travaux de CAQUOT relatifs à l'effet de paroi et à la proportion des vides laissés par les granulats. De plus il tient compte du mode de serrage du béton.

La figure (1-1) présente la courbe granulométrique de référence :



**Fig.1-1: Tracé de la courbe granulométrique de référence**

Cette courbe se définit comme suit :

$$\begin{aligned}
 \text{Point A : } & \left\{ \begin{array}{l} X=0.0065 \text{ mm (à traduire en } \sqrt[5]{d} \text{ )} \\ Y=0 \end{array} \right. \\
 \text{Point B : } & \left\{ \begin{array}{l} X=D/2 \\ Y = A + 17 \cdot \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\left(\frac{R}{D} - 0.75\right)} \end{array} \right. \\
 \text{Point C : } & \left\{ \begin{array}{l} X=D_{\max} \\ Y=100\% \end{array} \right. \quad (1.5)
 \end{aligned}$$

Le tronçon AB correspond aux grains dont les dimensions sont comprises entre 0 et  $D_{\max}/2$ ; alors que le tronçon BC correspond au diamètre supérieur à  $D_{\max}/2$ .

R: rayon moyen du moule.

$B=1.5$  pour des bétons mis en place par piquage, dans tous les autres cas  $B=1$ .

A est un coefficient fonction de la nature des granulats et des moyens de serrage de béton ; il est donné dans le tableau (1-2).

Moyen de mise en place du béton.	Sable roulé Gravier roulé	Sable roulé Gravier concassé	Sable concassé Gravier concassé
Mise en place par piquage	28 et plus	30 et plus	32 et plus
Vibration moyenne	24-25	27-28	28-29
Vibration poussée	23-24	23-25	23-24
Vibration puissante	19-20	19-21	19-22

**Tableau1-2: Les valeurs de coefficient A**

*Les valeurs de A pour les vibrations sont valables uniquement pour la table vibrante de 50-100 cycles par seconde et d'amplitude de 0.8*

- Estimation de l'eau de gâchage :

FAURY estime l'eau de gâchage égale au volume théorique des vides :

$$I = \frac{1000.k}{\sqrt[3]{D}} + \frac{1000k'}{\frac{R}{D} - 0.75}. \quad (1.6)$$

K'=0.004 pour un béton mou.

K'=0.003 pour un béton plastique.

K'=0.002 pour un béton ferme.

K est donner dans le tableau (1-3) :

Moyen de mise en place du béton.	Sable roulé Gravier roulé	Sable roulé Gravier concassé	Sable concassé Gravier concassé
Mise en place par piquage	0.345 et plus	0.345 et plus	0.0350 et plus
Vibration moyenne	0.265-0.285	0.285-0.35	0.300-0.335
Vibration poussée	0.255-0.280	0.260-0.285	0.265-0.295
Vibration puissante	0.245-0.165	0.250-0.280	0.255-0.295

**Tableau1-3: Valeurs de k**

Les valeurs de  $k$  pour les vibrations sont valables uniquement pour la table vibrante de 50-100 cycles par seconde et d'amplitude de 0.8.

- *Compacité:*

La compacité d'un tel béton sera donc :

$$\lambda = 1 - \left[ \frac{1000k}{\sqrt[3]{D}} + \frac{1000k'}{\frac{R}{D} - .75} \right].$$

(1.7)

En pratique, le dosage en ciment est imposé, il ne reste plus qu'à déterminer les proportions des granulats pour que la courbe de mélange solide soit la plus proche possible de la courbe de référence.

### **III-5- Méthode du C.E.B.T.P :** dite de "DREUX-GORISE"<sup>1,34</sup>

Cette méthode est une synthèse des différentes méthodes appuyées sur un examen statique de nombreux chantiers. Elle définit d'une manière rapide et simple la première formulation de la composition de béton en fonction de :

- La nature de l'ouvrage
- La résistance souhaitée
- L'ouvrabilité désirée.
- Le type et la qualité des granulats.

Cette méthode tient compte de :

- L'effet de paroi.
- La densité de ferrailage.
- Le mode de serrage.
- Le degré d'humidité des granulats.

### **III-6- Autres méthodes de composition des bétons :**

Nous pouvons citer les méthodes suivantes :

- Méthode de JOISEL<sup>1,34</sup>.
- La méthode approximative de DREUX et GORISE<sup>1,34</sup>.

## **Chapitre II :**

### **BETONS A HAUTES PERFORMANCES**

---

#### **I- Introduction :**

##### ***I-1- Définition :***

Les bétons à hautes performances sont des bétons ayant des résistances en compression supérieures à 60 MPa.

Depuis le début de 20<sup>ème</sup> siècle les chercheurs se sont intéressés à l'augmentation de la résistance à la compression du béton par différents procédés tels que la centrifugation ou la compression sur béton frais <sup>4</sup>.

Actuellement, on arrive, après une sélection des matériaux, à fabriquer de bons bétons maniables et très résistants, pour un supplément de prix raisonnable.

ces béton possèdent les caractéristiques suivantes <sup>4</sup> :

- ◆ Une compacité maximale.
- ◆ Une résistance très élevée.
- ◆ Un module d'élasticité élevé.
- ◆ Une déformation différée minimale.
- ◆ Une très bonne perméabilité.
- ◆ Une très bonne durabilité.
- ◆ Une très bonne liaison avec l'acier.

De nos jours c'est plutôt de **BETON A HAUTES PERFORMANCES** (BHP) dont il s'agit, car le terme «haute résistance» ne prend pas en considération la durabilité et les déformations différées.

### **I-2- Historique :**

Les BHP sont considérés comme des matériaux relativement nouveaux ; leur développement a évolué graduellement dans le temps.

Ainsi en 1950, un béton de 5000Psi(34 MPa) était considéré comme un béton à hautes performances. A partir de 1960 les Américains ont commencé à commercialiser des bétons de 41 à 50 MPa. Dans le début des années soixante-dix un béton de 62MPa a été produit.

De nos jours des bétons de plus de 150 MPa sont utilisés dans la construction <sup>2</sup>. On peut fabriquer des BHP en utilisant plusieurs combinaisons de matériaux si l'on est capable de diminuer le rapport eau/ciment (E/C) au-dessous de 0.4.

Il n'est généralement pas très difficile d'obtenir de tels bétons, ce qui est difficile à contrôler c'est l'affaissement des bétons durant une période relativement longue pour que l'on puisse le mettre en place avec les moyens conventionnels lorsqu'ils arrivent sur chantier <sup>5</sup>.

Nous distinguons les bétons de structure de la façon suivante <sup>2</sup> :

Bétons de construction	Résistance caractéristique
Bétons ordinaires(BO)	20-50 MPa
Bétons à hautes performances(BHP)	50-80 MPa
Bétons à très hautes performances(BTHP)	>80MPa

**Tableau2-1: Classification des bétons de construction**

Pour notre pays les recherches effectuées dans les différents laboratoires ont donné de bons résultats. Cependant ces matériaux restent nouveaux pour les constructeurs algériens. On n'est pas encore arrivé à utiliser ces matériaux sur chantier

## **II- Composition des bétons a hautes performances :**

### **II-1- Choix des matériaux :**

Malheureusement nous ne pouvons pas avoir des BHP avec n'importe quels matériaux, pour y palier plusieurs études sont effectuées dans ce sens.

Vu la complexité de ce matériau, nous ne prétendons pas faire un inventaire exhaustif des multiples questions concernant le choix des constituants des BHP. Par contre, il est intéressant de rédiger une première synthèse en nous appuyant sur des travaux qui sont déjà effectués par différents laboratoires notamment le LCPC de Paris <sup>6</sup>.

### **II-1-1 Granulats :**

Les granulats sont les constituants les moins nobles du béton (excepté l'eau, bien sur), et ceux que l'on prend autant que possible sur place pour minimiser le coût. Ils occupent environ 70% du volume du béton frais et à ce titre, ils interviennent directement sur les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

La discussion sera centrée autour des caractéristiques principales des granulats et leur influence sur les propriétés du béton à hautes performances :

- **Forme des granulats :**

Elle peut se caractériser par deux grandeurs (sphéricité et angularité) lesquelles interviennent directement sur la capacité propre, car pour les mêmes tailles de grains (0.6mm) la compacité propre d'un sable concassé (simulation numérique de l'expérience de FERET <sup>6</sup>) est inférieure à celle d'un sable roulé (simulation numérique de JOISEL <sup>6</sup>).

On en déduit que pour élaborer un mélange granulaire compact, il sera préférable de choisir une forme de grains se rapprochant le plus possible de la sphère surtout pour la classe dominante.

Cependant des granulats concassés ont généralement une rugosité supérieure à celle des granulats roulés ; ceci favorise l'imbrication de la pâte et du granulat, d'où une meilleure adhérence, par conséquent une meilleure résistance (résultat démontré pour les bétons ordinaires (BO) par CONJEAUD et al <sup>6</sup>.

Quant aux résistances atteintes, des formes anguleuses sont certainement néfastes car elles poinçonnent la matrice aussi bien en présence qu'en absence de chargement extérieur <sup>5</sup>.

De ce point de vue les granulats roulés sont donc certainement préférables.

- **Résistance mécanique :**

La résistance mécanique des granulats a autant d'importance si ce n'est davantage.

Des essais comparatifs <sup>6</sup> entre deux mini bétons. Dans le mini béton I les granulats étaient des calcaires concassés. Dans le béton II on a utilisé des granulats spéciaux très durs (dont les plus gros sont également concassés). Les compositions exactes et les résistances à 28 jours sont indiquées sur le tableau (2-2).

Les expériences montrent que dans "la course à la résistance", il est nécessaire de prendre des granulats spéciaux à partir de 120 à 130 MPa. On entre alors dans une gamme de matériaux dont le coût unitaire empêchera probablement les applications dans le génie civil.

Constituants	Dosages
<b>Mini béton I</b>	
Granulats calcaires 5/12.5	1136 kg/m <sup>3</sup>
Sable calcaire 0/5	620 kg/m <sup>3</sup>
Ciment HTS	544 kg/m <sup>3</sup>
Fumée de silice SEPR	98 kg/m <sup>3</sup>
Fluidifiants LOMAR D(Naphtalène)	9.3 kg/m <sup>3</sup>
Eau	126.8 l/m <sup>3</sup>
E/C	0.233
S/C	0.180
Résistance moyenne en compression à 28 j	<b>110 MPa</b>
<b>Mini béton II</b>	
Granulats de bauxite calcinée 4/6 mm	1747 kg/m <sup>3</sup>
Granulat électro-fondu de zircon 0.5/2 mm	1149 kg/m <sup>3</sup>
Ciment HTS	649 kg/m <sup>3</sup>
Fumée de silice SEPR	117 kg/m <sup>3</sup>
Fluidifiants LOMAR D(Naphtalène)	11.7 kg/m <sup>3</sup>
Eau	126 l/m <sup>3</sup>
E/C	0.25
S/C	0.18
Résistance moyenne en compression à 28 j	<b>181 MPa</b>
Eprouvette (4*4*16)	

**Tableau2-2: Composition et résistance des minis bétons I et II**<sup>6</sup>

S : désigne la fumée de silice

- **Raideur:**

La rupture des BHP arrive quand les caractéristiques des granulats se rapprocheront de celle de la pâte de ciment. Le module d'YOUNG des roches naturelles étant toujours supérieur, on

peut penser qu'on a intérêt à réduire la raideur des granulats, afin de diminuer les concentrations de contrainte dans la pâte liante <sup>3,6</sup>.

- **Nature minéralogique :**

Des réactions néfastes peuvent se produire à l'interface pâte - granulats (comme les réactions alcali-granulats qui produisent des gels gonflants <sup>6</sup>) due à l'association chimique de certains type de granulats à la pâte de ciment.

**En résumé**, nous pouvons avancer ceci <sup>5,6</sup> :

- La résistance mécanique des granulats influe sur celle des BHP. Bien que cette résistance croisse généralement avec la raideur, des granulats durs (résistants) qui donnent de très bons bétons HP car leurs modules d'YOUNG varient dans des proportions moindres que leurs résistances en compression.
- On aura parfois intérêt à ne pas s'approvisionner à la source la plus proche en granulats, selon les résistances recherchées et disponibilités locales.
- Le granulat idéal est un granulat sphérique de haute résistance, pas trop rigide et adhérent à la matrice.
- Le meilleur gravier doit être propre, cubique, angulaire, 100% concassé, non aplati, avec minimum de composants rectangulaires.

### **II-1-2- Ciment :**

Les ciments utilisés dans la construction sont caractérisés par leurs constituants, clinker pur avec gypse ou sulfonate de calcium (CPA), clinker avec laitier (CLK, CHF) ou clinker avec ajout divers(CPJ) <sup>6</sup>.

Le choix des ciments portlands pour les BHP est extrêmement important. Il est recommander d'utiliser les ciments portlands artificiels(CPA)de classe 55 ou HP, éventuellement 55R ou HPR composés de plus de 97% de clinker (3% de filler) car ils assurent une bonne résistance mécanique en donnant à la pâte liante une bonne compacité <sup>2</sup>.

Il est nécessaire de moudre finement le clinker afin d'obtenir une bonne résistance mécanique, ainsi pour le même dosage on augmente la proportion d'hydrates dans le béton durci par rapport au anhydres. Cependant, cette proportion d'hydrates est limitée par la quantité d'eau disponible dans les BHP. L'exigence de finesse provient d'avantage de la compacité nécessaire de la pâte. Elle confère en outre au béton <sup>6</sup> une résistance précoce <sup>6</sup>.

La surface spécifique "Blaine" doit être de l'ordre de 3500 à 4000 cm<sup>2</sup>/g <sup>5</sup>. Cependant si on cherche à augmenter encore cette finesse, les procédés de broyage industriel sont tel que la proportion de grains de ciment ultra fins devient importante. Le risque est alors grand

d'obtenir une prise instantanée dès le gâchage ou en tout cas un ciment à forte chaleur d'hydratation, génératrice de contraintes d'origine thermique, et donc de fissuration de peau dans les pièces massives <sup>6</sup>.

Sur le plan de la composition chimique on sait que le ciment de type CPA comporte quatre constituants principaux : les silicates bi et tricalcique ( $C_2S$ ,  $C_3S$ ), les aluminates tricalciques ( $C_3A$ ) et les ferro aluminates tetra-calcique ( $C_4AF$ ) dans les proportions suivantes <sup>6</sup>

- $C_3S \cong 60\%$
- $\beta C_2S \cong 20\%$
- $C_3A \cong 10\%$
- $C_4AF \cong 10\%$

Le  $C_3A$  est le premier à s'hydrater, suivi de  $C_3S$  puis du  $\beta C_2S$  et de  $C_4AF$ .

Malheureusement si le  $C_3A$  confère des résistances au jeune âge souvent intéressantes (possibilité de décoffrage rapide), il a pour inconvénient de modifier le comportement rhéologique du béton frais, particulièrement en présence d'adjuvants. Il est responsable d'un raidissement rapide du béton <sup>2</sup>.

On peut prévoir les résistances des mortiers adjuvants par la formule de type FERET <sup>6</sup> :

$$F_c = k * R_c / [1 + 3.1E/C]^2 \quad (2.1)$$

Où :  $F_c$  la résistance de mortier à 28 jours.

$R_c$  la classe de ciment.

$K$ : est un coefficient dépendant de la dimension des granulats.

En s'appuyant sur les travaux effectués par DE LARRARD <sup>6</sup>, on peut conclure que pour obtenir :

- Un matériau de bonne maniabilité pendant au moins une heure après le malaxage, et ce sans addition de retardateur.
- Un faible rapport ( $e/c < 0.3$ ) devant limiter les déformations différées et assure une meilleure compacité.

**Il est recommandé d'utiliser un ciment CPA55 ou HP.**

Pour le béton à hautes performances, le dosage en ciment varie entre 392 et 557 Kg/m<sup>3</sup>.

A partir des travaux publiés par LACROIX et al. <sup>5</sup> on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le ciment portland ordinaire est suffisant pour obtenir un BHP.

- La résistance augmente avec le contenu du ciment, mais il semble y avoir un optimum d'économie autour de 425 Kg/m<sup>3</sup>.
- Il est possible de substituer des fillers minéraux pour 15% du ciment sans changer appréciablement la résistance.

### **II-1-3- L'eau de gâchage :**

Le but recherché est de diminuer sa quantité, mais sa nature est identique à celle utilisée pour les bétons ordinaires (BO).

Elle doit être propre. Les stipulations de la norme P18.300<sup>5</sup> doivent être respectées et toute eau douteuse doit être analysée avant l'emploi.

- Le but est d'augmenter au maximum la compacité du béton. Pour cela on doit : Diminuer au maximum la quantité d'eau libre qui peut être absorbée par les granulats en fonction de leur porosité ouverte, mais qui est surtout destinée à obtenir une plasticité du béton frais qui permettrait une mise en place correcte dans les moules ou coffrages, cette eau s'éliminera en partie durant le durcissement du béton, mais laissera alors des vides qui nuiront à la compacité.
- L'idéal étant de ne laisser que la quantité d'eau de gâchage fixée par les éléments anhydres du ciment et qui entrera dans le processus d'hydratation. Elle est donc indispensable. La maniabilité du béton doit être assurée par d'autres moyens. Alors qu'un béton ordinaire a un rapport E/C d'environ 0.5, celui d'un BHP est bien au-dessous de 0.4 et celui des BTHP est encore plus bas<sup>2</sup>. Cependant cet idéal est loin d'être atteint de nos jours.

### **II-1-4- Le sable :**

Peu de recherches ont été faites sur ce matériau. Les sables utilisés pour les BHP doivent avoir un module de finesse élevé pour nécessiter moins d'eau.

La granulométrie du sable n'a pas d'influence à court terme, par contre à long terme et pour des résistances élevées, des sables à granulométrie continue donnent de meilleures résistances que les sable à granulométrie discontinue<sup>5</sup>.

Il est préférable d'avoir le moins possible de grosses dimensions( $\varphi > 5\text{mm}$ ) ; ceci entraîne des défauts d'adhérence<sup>2</sup>.

### **II-1-5- Les adjuvants :**

Les adjuvants sont ajoutés en faible quantité pour modifier les propriétés du béton par leur action physico-chimique. Ils se présentent sous forme de liquide, de poudre ou de paillettes.

On distingue trois grandes familles d'adjuvants<sup>2</sup> :

- Ceux qui améliorent la maniabilité du béton frais (plastifiants, réducteurs d'eau, fluidifiants).
- Ceux qui influencent le temps de prise et/ou durcissement (accélérateurs, retardateurs)
- Les adjuvants relatifs à d'autres propriétés du béton (hydrofuge, antigels, colorants).

Les adjuvants utilisés pour obtenir les BHP et BTHP doivent assurer une bonne maniabilité du béton frais pour compenser un dosage en eau réduit.

Les particules de ciment portland présentent de nombreuses charges électrostatiques sur leur surface. En présence d'eau, ces charges provoquent une réorganisation sous la forme d'une **floculation** et qui sera neutralisée par les adjuvants.

a) *Les dispersants et lignosulfates :*

Ils sont les premiers à être utilisés, mais leur efficacité était relativement limitée puisque certains dosages produisaient des effets secondaires néfastes, en particulier l'entraînement d'air.

b) *les fluidifiants :*

Dés les années trente, les Américains connaissaient déjà les propriétés dispersantes des polycondensés de formaldehydes et de mélanine sulfonate. Mais c'est dans les années soixante-dix que l'industrie en a pleinement profité<sup>2</sup>. A la même époque, on a également commencé à utiliser du naphthalène sulfonate avec sa forme linéaire en ruban. Cette forme lui a permis d'envelopper parfaitement uniformément de charges négatives. Ceci permet aux particules de ciment de repousser alors mutuellement ; leurs mouvements sont donc favorisés, voir presque forcés<sup>2</sup> et la maniabilité de la pâte de ciment devient maximale.

Les superplastifiants sont les plus récents des adjuvants pour le béton. En Algérie, les adjuvants sont relativement peu utilisés dans l'industrie de la construction bien que **GRANITEX** (société Algérienne de fabrication des adjuvants) ait commencé leur production depuis quelques années.

Actuellement, deux types d'adjuvants fluidifiants sont généralement utilisés dans des formulations de béton HP et THP. Ce sont d'une part les naphthalènes sulfonates (N.S), et d'autre part les résines mélanines (R.M).

**II-1-6- Ultrafines :**

Ces produits ont un rôle double :

- Un rôle granulaire : c'est à dire la capacité de s'intercaler dans la structure des grains de ciment diminuant la teneur en eau.

- Un rôle pouzzolanique ou plus précisément rôle de liant, par lequel les ultrafines s'associent partiellement ou totalement avec l'eau et/ou certains composés du ciment (par exemple la chaux). On distingue trois types d'ultrafines

- a) *Produits de broyage* : ceux-ci sont caractérisés par leur granularité, que l'on a pu mesurer à la sérigraphie <sup>6</sup>, et par leur nature minéralogique. En particulier, les finesses que l'on peut atteindre par broyage sont telle qu'on aura toujours des interactions granulométriques avec le ciment.
- b) *Fumée de silice (FSC)* : sont des sous produits de fabrication de silicium et ses alliages. les propriétés des fumées de silices se diffèrent suivant la composition, suivant les produits secondaires ajoutés aux ingrédients principaux suivant la méthode de fabrication etc.,  
La FSC possède deux effets principaux :
- *Pozzolanique*: qui consiste à fixer la chaux  $\text{Ca(OH)}_2$  pour former un composant plus consistant C-S-H (silicate de calcium) <sup>2</sup>.
  - *De remplissage* : qui consiste à combler les vides (de l'ordre de Micron)
- c) *Hyperfines*: nous désignons par ce vocable des produits encore plus fins que la fumée de silice, comme par exemple les silices précipitées dont les surfaces spécifiques peuvent atteindre  $500\text{m}^2/\text{g}$ . En cherchant des granulométries pour l'obtention de haute compacité on est tenté d'ajouter encore au mélange une quatrième tranche venant s'intercaler entre les grains ultrafines. A partir d'une certaine taille, on se heurte à un problème de rétention de l'eau <sup>6</sup>. En effet, l'adsorption de l'eau sur une surface s'accompagne d'un phénomène de contraction : la densité peut atteindre localement une valeur de 1.2 au voisinage des grains de clinker.

### **II-2- Proportion des matériaux :**

En vue d'obtenir une certaine maniabilité et une certaine résistance mécanique, il nous faut doser en proportions convenables les matériaux décrits précédemment. Les bétons HP peuvent ne pas contenir des ultrafines et atteindre des résistances caractéristiques supérieures à 60 Mpa à 28 jours. Leur squelette granulaire présente un bon compromis d'économie, qui pousse à l'utilisation des ressources locales, et l'exigence de certaines qualités. Ce sont par ailleurs des bétons à faible dosage en pâte interstitielle : 400 à 500 kg de ciment pour des rapports E/C de 0.3 à 0.35.

Une faible proportion de la pâte de ciment peut être substituée par une pâte contenant des ultrafines.

D'après FARRIS <sup>6</sup>, la viscosité des bétons régie par celle de la matrice (ou pâte)

### II-2-1 Choix de la conservation de volume de pâte :

#### A. Essai d'écoulement au cône :

Pour apprécier la viscosité d'une pâte de ciments, il faut concevoir un essai simple répétitif portant sur une quantité de matériau raisonnable inspiré de l'essai de "cône de MARCH"(fig.2), mais le rétrécissement de la surface libre en cours d'essai provoque un plissement de la pellicule superficielle surnageant la suspension. Ce phénomène nuisant alors à la répétition, on a finalement diminué le volume s'écoulant pendant le temps T, et modifier la manière de le mesurer en plaçant un flacon en dessous du cône au début de l'essai en remplissant complètement le cône. L'opérateur arrêtant le chronomètre des que la suspension débordait de flacon(fig.2-2)

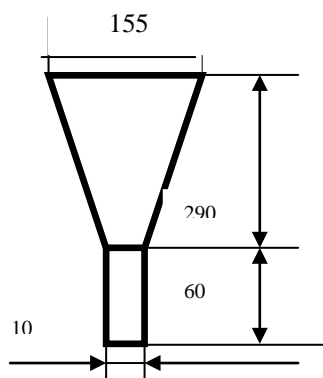
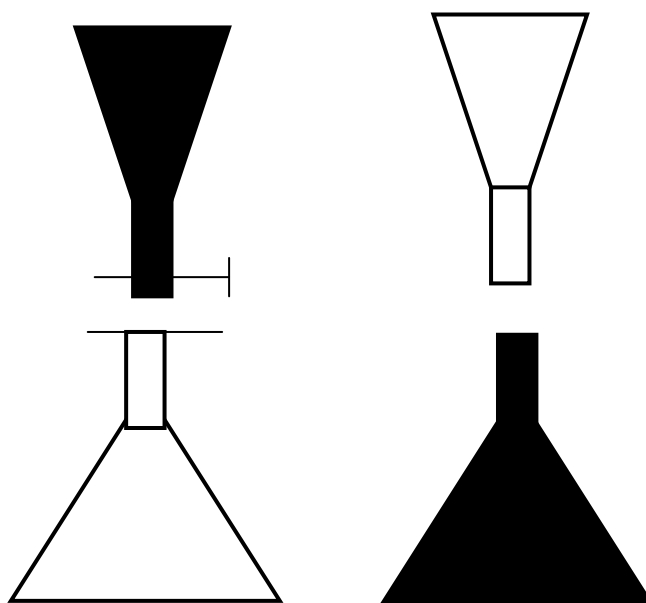
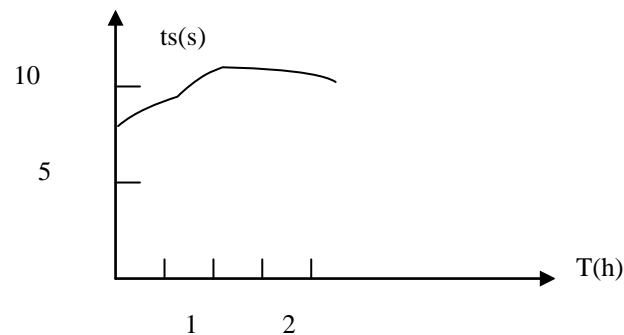


Fig.2-1: Cône de MARCH



Ensuite il faut déterminer le temps d'attente à observer entre le gâchage et la mesure puis on trace le graphe  $t(s)$ [temps d'écoulement]=fonction[temps d'attente]



**Fig.2-3: Temps d'écoulement en fonction du temps d'attente**

- *Influence de l'eau de mouillage des granulats :*

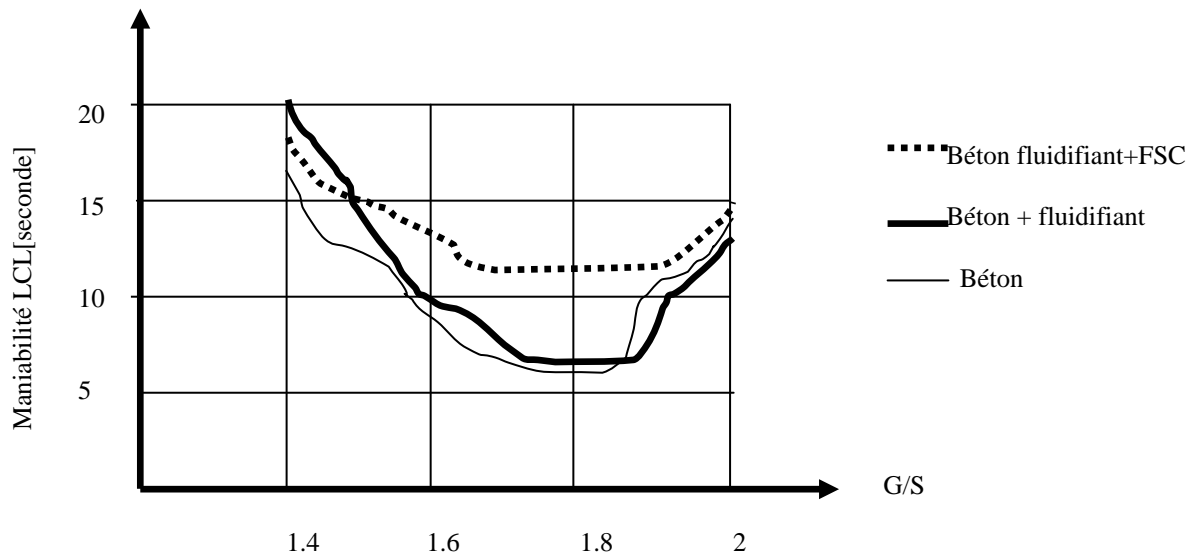
Il faut toutefois une correction à l'approche de FARRIS <sup>6</sup>, en remarquant que sur le volume global de l'eau de gâchage, une quantité est absorbée par les granulats.

Une mesure technologique simple comme le cône d'ABRAMS permet de séparer les bétons en deux classes : d'une part les bétons "maniabiles" que l'on peut mettre en place par les moyens classiques, d'autre part les bétons très raides. La méthode indiquée dans la référence <sup>6</sup> permet avec un minimum de manipulations d'obtenir un béton HP de la première classe à dosage raisonnable en pâte liante.

- *Squelette granulaire :*

Une méthode expérimentale de détermination des proportions optimales a été développée par BARON et LESAGE <sup>6</sup>. Elle part de la constatation selon laquelle ces proportions optimales correspondent au mélange de maniabilité maximale, l'application de ce processus à un béton binaire [une classe de sable S et une classe de gravier G] dont on a cherché le meilleur rapport G/S.

Pour des pâtes normales (ciment + eau), pâtes HP (ciment + fluidifiant + eau) et pâtes THP (ciment + fumée de silice + fluidifiant + eau) les courbes obtenues sont les suivantes <sup>6</sup> :



**Fig.2-4: Application de la méthode BARON LESAGE pour la détermination de la proportion optimale du squelette**

A la précision des expériences près, on peut considérer que la maniabilité est atteinte pour les trois pâtes à G/S=1.8.

**II-2-2 Dosage en fluidifiants :**

L'essai de cône précédemment défini permet de déterminer le dosage efficace en fluidifiants : opérant par un ajout successif dans une suspension, on voit que le temps d'écoulement diminue puis se stabilise.

On constate que le dosage efficace correspond à la dose nécessaire pour saturer 3/4 de la surface des particules de ciment. Les travaux effectués dans <sup>6</sup> nous donnent les résultats suivants.

Masse de FSC % ----- Masse de ciment	Masse de Fluidifiant % ----- Masse de ciment
0	1.4
5	1.6
10	1.8
15	2.0
20	2.3
25	2.9
30	3.5

**Tableau2-3: Dosage des fluidifiants en fonction de celui de fumée de silice**

**II-2-3 Proportion des minéraux :**

Grâce au modèle linéaire exposé par DE LARRARD <sup>6</sup> on peut ordonner selon leur compacité les combinaisons des produits donnés, connus par leur granularité.

On pourrait chercher à augmenter encore la compacité atteinte en resserrant les différentes classes de granulaires. Etant donnée l'étendue granulaire totale des composants de la pâte, la combinaison optimale comporterait beaucoup plus de deux classes élémentaires <sup>6</sup>.

**Chapitre III :****PROPRIETES DES BETONS A HAUTES  
PERFORMANCES*****I- Propriétés à l'état frais et mise en œuvre :******I-1 L'ouvrabilité - maniabilité :***

La maniabilité définit la faculté du matériau à être travaillé ou mis en œuvre.

L'ouvrabilité des BHP est bonne, malgré des dosages en eau très inférieurs aux dosages habituels. Ces bétons présentent le plus souvent un affaissement au cône d'ABRAMS d'environ 20 cm à la sortie de malaxeur. Ils peuvent donc être qualifiés de fluides (affaissement >16 cm)

***I-2 Pompabilité :***

Les BHP peuvent avoir des caractéristiques de maniabilité qui leur confèrent une pompabilité exceptionnelle tout en préservant de très bonnes caractéristiques mécaniques.

***I-3 Ségrégation :***

Ces nouveaux bétons ont une granularité continue et un dosage en eau très faible. La présence des fluidifiants disperse uniformément le liant qui établit une liaison d'adhérence avec tous les grains sur l'ensemble de leur surface d'où une forte viscosité pour ces bétons qui écarte tout risque de ségrégation.

***I-4 Ressuage :***

C'est la remonte de l'eau vers la surface libre sous l'effet de la vibration essentiellement. L'absence de ressuage semble être aujourd'hui une caractéristique de ces bétons, même si encore certains chercheurs affirment qu'une vibration exagérément poussée peut tout de même le provoquer. De même façon l'usage exagéré des fluidifiants accentue le ressuage.

**I-5 Mise en œuvre :**

Une attente sur chantier peut provoquer une perte d'affaissement qui peut conduire à devoir rajouter de l'eau aux BHP, cet ajout, déjà déconseillé pour les bétons ordinaires<sup>2</sup>, peut s'avérer extrêmement préjudiciable dans le cas de matériau à hautes performances ; cette pratique est donc à proscrire.

Plus visqueux, un BHP se répandra plus facilement dans le coffrage en s'étalant spontanément, mais sa vibration est cependant indispensable pour éliminer les bulles d'air créées pendant le malaxage ou emprisonnées lors du bétonnage.

Il faut porter une très grande attention aux reprises de bétonnage afin d'obtenir un joint assurant une bonne continuité de la structure, le traitement devra s'effectuer le plus rapidement possible après le décoffrage.

La manipulation des BHP a donc tendance à demander plus de précaution que d'autres bétons. Elle nécessitera une organisation plus rigoureuse et la mise en place de procédure d'exécution et de contrôle à suivre systématiquement.

**II- Propriétés mécaniques BHP :****II-1- La prise et le durcissement :**

Sont similaires à ceux qui se produisent au sein des bétons ordinaires, seulement il faut faire attention de "la fausse prise" qui est causée par le ciment à fine mouture.

**II-2- Déformations libres (sans chargement) :**

Ce sont des déformations qui se développent dans les bétons et provoquent souvent des fissurations, chemin privilégié de la pénétration des agents agressifs. Ces déformations sont conditionnées par la température et la teneur en eau libre. Parmi ces déformations, on distingue :

1. *Le retrait thermique* : celui-ci est entraîné par l'élévation de la température qui accompagne l'hydratation du ciment. Pour des raisons de compatibilité avec les adjuvants<sup>2</sup> et pour obtenir la chaleur d'hydratation on est tenté d'opter pour des ciments à faible teneur en aluminates qui sont généralement peu exothermiques.

2. *Le retrait d'hydratation (retrait endogène)* : l'hydratation du ciment consomme de l'eau et à volume décroissant <sup>2</sup>. Le produit de la réaction d'hydratation diminue de volume en durcissant.
3. *Le retrait de séchage* : provoqué par la migration de l'eau de l'intérieur vers l'extérieur (évaporation).
4. *Le retrait total* : est la somme des trois phénomènes précédents.

### **II-3 La microstructure, porosité et compacité :**

Les vides suivants peuvent être continus dans le béton durci :

- Des bulles d'air occlus (lors de malaxage) non totalement éliminées par les vibrations, leur volume est moins de 2% du volume total du béton.
- Des vides constitués des vestiges des espaces intergranulaire de la pâte fraîche.
- Des vides de l'ordre du manomètre dans la structure même des hydrates.

La microstructure des BHP est très dense, globalement amorphe. L'interface pâte/granulat est pratiquement non poreuse et ne comporte pas d'accumulation habituelle de cristaux de chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  <sup>2</sup>.

La microstructure des bétons est liée à différents phénomènes physico-chimiques internes (sédimentation, chaleur d'hydratation, autodissication...etc.) et des contraintes externes mécaniques. Malgré quelques microfissurations qui parcourent la matrice, la pâte liante d'un BHP paraît homogène et compacte.

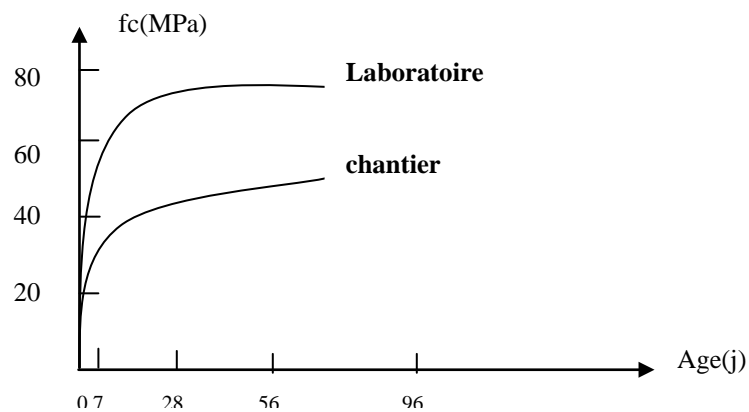
### **II-4- Les déformations différées sous charge:**

Les BHP subissent les mêmes déformations que les BO sous chargement constant. Cependant, le fluage est lié aux conditions ambiantes et la teneur en eau du béton. Le fluage dépend aussi du type de la structure et de son retrait de dessiccation <sup>2</sup>. On distingue:

- *Le fluage de dessiccation*: il peut être considéré comme étant le retrait de dessiccation d'une structure chargée.
- *Le fluage propre*: Le fluage propre de la pâte de ciment résulte du déplacement (glissement ou dissolution-recristallisation) des cristaux d'hydrates les uns par rapport aux autres, lorsque ceux-ci sont soumis à des contraintes.
- *Le fluage total*: c'est la somme de deux phénomènes précédents, son amplitude est 2 à 3 fois moindre que les bétons ordinaires

**II-5- Résistance en compression:**

La résistance à la compression est la plus importante propriété du béton, car elle évolue dans le temps, souvent dans le bon sens, quelque fois dans le mauvais<sup>5</sup>. Donc il est intéressant de considérer la cinétique de la montée en résistance. Car celle-ci est plus rapide que celle des bétons ordinaires<sup>2</sup> (figure(3-1)). Ceci résulte de la proximité initiale des grains de ciment dans le béton frais, ainsi que de rôle de catalyseur et d'accélérateur de durcissement de la fumée de silice.



**Fig.3-1: Gain de résistance en fonction du temps<sup>5</sup>**

La précocité des résistances peut être affinée à volonté dans la pratique à travers le choix et le dosage du ciment, sa teneur en aluminates et sa finesse de mouture, mais aussi par l'incorporation ou non d'un retardateur de prise et d'un accélérateur de durcissement<sup>2</sup>.

La résistance en compression dépend essentiellement de rapport E/C qui reste un facteur prédominant dans la composition de ces matériaux. Il est clair que la résistance en compression des bétons augmente lorsque le rapport E/C diminue.

Les travaux effectués par GUTUERREZ et GANOVAS<sup>7</sup> ont pu extraire une formule empirique, à partir du graphe (résistance de compression =  $f(E/C)$ ) réalisée pour une série d'essais.

$$f_{cm} = 140e^{-k \frac{E}{C}} \text{ (MPa)} \quad (3.1)$$

$f_{cm}$  est la résistance moyenne en compression

$k$  est un paramètre qui dépend du dosage en fumée de silice et de type de ciment donné dans le tableau (3-1) <sup>7</sup>.

Paramètre $k$	Ciment 145-A	Ciment 155-A
0% de fumée de silice	2.10	1.97
5% de fumée de silice	1.70	1.60
10% de fumée de silice	1.41	1.31
15% de fumée de silice	1.24	1.15

**Tableau3-1: Valeurs de  $k$**

La résistance en compression du béton est influencée par l'âge du béton que l'on effectue l'essai et dans une certaine mesure, par la forme et la dimension des éprouvettes que l'on teste. Comme le montre le tableau (3-2) <sup>3,5</sup>.

Forme de l'éprouvette	Cylindre(16×32) Faces rectifiées	Cube(10x10x10) Faces coffrées	Cube(20x20x20) Faces coffrées
$f_{cm}$	102 Mpa	107 MPa	97 Mpa

**Tableau3-2: Résistance moyenne à la compression obtenue par différentes éprouvettes**

Le rôle de surfacage des éprouvettes est d'éliminer les défauts de surface des faces d'appuis pour une meilleure distribution des contraintes.

Le tableau (3-3) donne les différents types de rupture selon l'excentricité de la charge et le type du béton <sup>5,6</sup>.

Excentricité(mm)	B-O	Type de rupture	BHP	Type de rupture
0	29.3	Conique	115	Conique
4	30.0	Conique	115	Conique
6	28.7	Conique	108	Biseau
12.5	26.5	Biseau	85.3	Eclatement

**Tableau3-3: Résistance en compression de 8 échantillons**



**Conique**



**Biseau**



**éclatement**

**Fig3-2:Types de rupture rencontrés lors des essais d'écrasement**

La formule de FERRET <sup>5</sup> est très utilisée actuellement.

$$f_{c28} = \frac{k_g R_{c28}}{\left(1 + 3.1 \frac{E/C}{1.4 - 4e^{11/c}}\right)^2} \tag{3.2}$$

R<sub>c28</sub> la classe vraie du ciment.

E, S, C poids respectifs de l'eau, de fumée de silice et de ciment par mètre cube de béton.

K<sub>g</sub> paramètre dépendant de la qualité des granulats.

Le règlement français dans sa nouvelle version prend en considération l'évolution cinétique des BHP comme suit :

$$f_{cj} = \frac{j}{4.76 + 0.83j} f_{c28} \text{ pour } f_{c28} < 40 \tag{3-3}$$

Pour :  $40\text{MPa} \leq f_{c28} \leq 60\text{MPa}$ ,

$$f_{cj} = \frac{j}{1.40 + 0.95j} f_{c28} \quad (3.4)$$

**Remarque :** Il faut absolument tenir compte de l'environnement dans lequel le béton va remplir sa fonction structurale.

#### **II-6- Résistance à la traction par fendage (ft):**

Elle croit sensiblement par rapport au BO. Cependant, elle croit moins rapidement que la résistance en compression ; pour les bétons les plus résistants le rapport  $f_t/f_c$  peut atteindre 1/20.

La formule empirique de BAEL/BPEL 91  $f_{tj} = 0.6 + .06f_{cj}$  semble surestimer la résistance à la traction au-delà de 40MPa.

La relation linéaire telle qu'adoptée par le règlement français risque de surestimer de trop la résistance en traction et donc elle doit être revue particulièrement pour des bétons dépassant les 60 MPa en compression

#### **II-7- Résistance à la traction par flexion (fr):**

Le module de rupture s'en déduit de la formule suivante:

$$f_r = \frac{M}{I} V .$$

Les corrélations obtenues se situent entre  $0.59\sqrt{f_c}$  et  $0.94\sqrt{f_c}^3$ .

$$\text{Pour DIATTA}^9. f_r = 2.3\sqrt{f_c} - 10.7 \quad (3.5)$$

pour :  $42.6\text{MPa} \leq f_c \leq 103.1\text{MPa}$

Il était l'objet de plusieurs investigations des chercheurs, pour les BHP et les BTHP ces recherches ont permis de déterminer la plage comparant le module de rupture <sup>3</sup>:

$$f_r \in [7.5\sqrt{f_c}, 12\sqrt{f_c}] \quad (3.6)$$

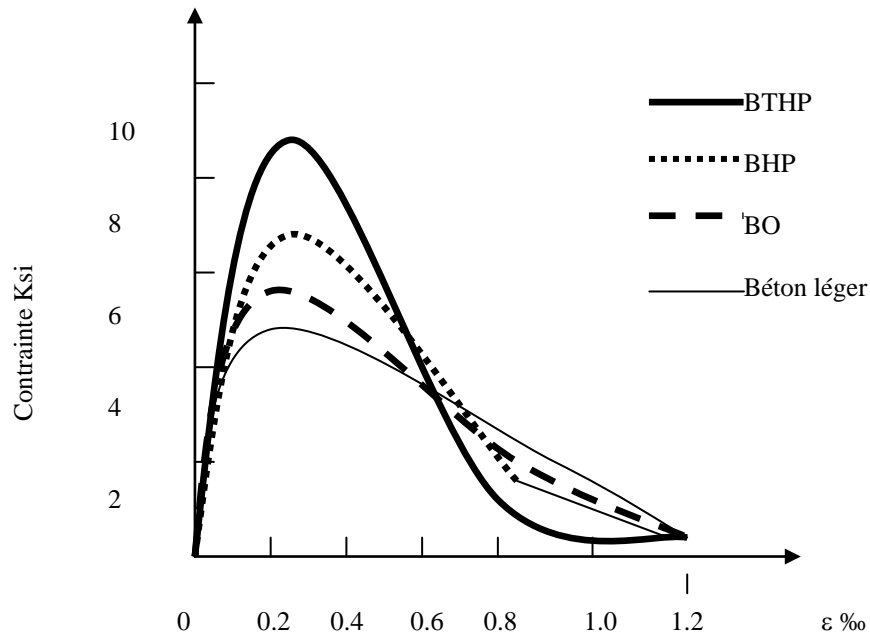
Des chercheurs recommandent l'équation suivante pour des différents  $f_c^5$ :

$$f_r = 0.94\sqrt{f_c}; 21 \leq f_c \leq 83\text{MPa}.$$

**II-8- Courbe contrainte déformation:**

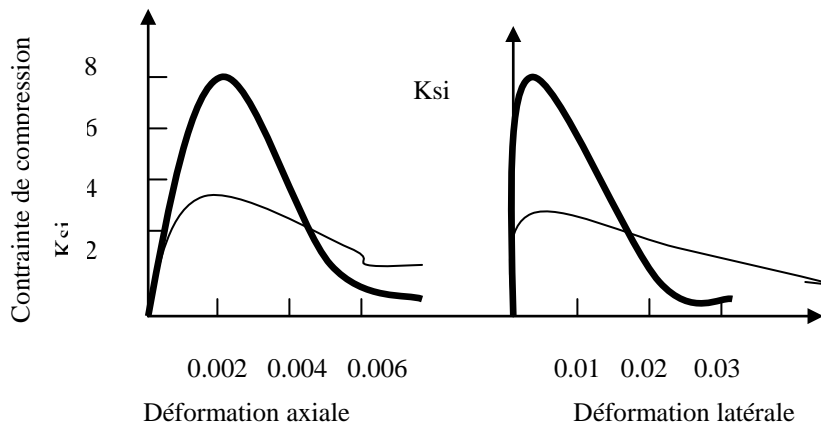
La partie ascendante du diagramme  $\sigma$ - $\epsilon$  du BHP est quasi linéaire <sup>4</sup> et raide <sup>5</sup>. La partie descendante du diagramme du BHP est difficile à obtenir même si la vitesse de déformation est contrôlée, ce qui a laissé penser que les BHP sont fragiles.

L'expérimentation a montré le chargement nécessaire pour qu'une fissure progresse dans le BHP est plus que dans le cas des bétons ordinaires, d'où un supplément de sécurité quant aux défauts dus à la mise en œuvre.



**Fig.3-3: Diagramme complet contrainte déformation pour divers bétons <sup>3</sup>.**

Une méthode simple pour la détermination de la partie descendante est décrite par ACI 363 <sup>3</sup>.



**Fig3-4: Contrainte axiale en fonction des déformations axiales et déformations latérales**

**II-9- Module d'élasticité:**

Le module d'élasticité  $E_c$  du béton est d'une grande importance pour les calculs des structures en béton.

MARLINEZ, NILSON et SLATE ainsi que MORENOT et SHAU ont développé la formule suivante qui était reprise par ACI363<sup>3,5</sup>. C'est une corrélation entre  $E_c$  et  $f_c$ :

Pour :  $21MPa \leq f_c \leq 83MPa$

$$E_c = 3320\sqrt{f_c} + 6900. \quad (3-7)$$

ACI 318<sup>8</sup> recommande  $E_c = 4700\sqrt{f_c}$

PAUW<sup>3</sup> quant à lui donne :

$$E_c = 0.043W^{1.5}\sqrt{f_c}; \quad (3-8)$$

$$2.5MPa \leq f_c \leq 40MPa; W_c = 1500 \text{ à } 2500 \text{ kg/m}^3$$

D'autres ont établi des formules reliant directement le module d'élasticité à la résistance en compression pour des valeurs de  $f_c$  dépassant 100Mpa<sup>3,5</sup>.

$$E_{28j} = 0.20f_c + 20(GPa);$$

$$E_{c365j} = 0.19f_c + 24.8(GPa); \text{ avec } . \quad (3-9)$$

$f_c$  en MPa

PARROTT recommande l'équation suivante pour le module d'élasticité du béton<sup>8</sup> :

$$E_{28} = c_0 + 0.2f_{c28}. \quad (3-10)$$

Pour  $20MPa \leq f_{c28} \leq 70MPa$ .

$c_0$  facteur étroitement lié au module d'élasticité des granulats

L'évolution de module d'élasticité dans le temps en fonction du module d'élasticité à 28 jours, de la résistance à la compression et de la résistance en traction est donnée par la relation suivante<sup>3</sup> :

$$E_t = E_{28} (0.4 + 0.6f_t / f_{c28}) \quad (3-11)$$

Cependant une loi de la forme<sup>5</sup>  $E_{cj} = k^3 \sqrt{f_{cj}}$  décrit bien l'évolution de  $E_{cj}$  avec  $f_{cj}$ .

**II-10- Coefficient de POISSON:** C'est le rapport de la déformation latérale à la déformation suivant la direction de chargement.

Les données expérimentales sur les valeurs de ce coefficient sont très limitées<sup>3</sup>.

PERENCHIO et KLIGER<sup>3</sup> rapportent que le coefficient de POISSON  $\nu$  est compris entre 0.20 et 0.28 pour des BHP de densité normale, pour une plage située entre 50 et 80 MPa. Pour YAYA DATTA<sup>9</sup> ce coefficient  $\nu$  varie entre 0.20 et 0.23 pour des résistances en compression simple comprises entre 43 et 85 MPa.

Pour FRANÇOIS DE LARRARD<sup>6</sup>  $\nu = 0.23$  POUR les BHP, et  $\nu = 0.20$  pour les bétons ordinaires.

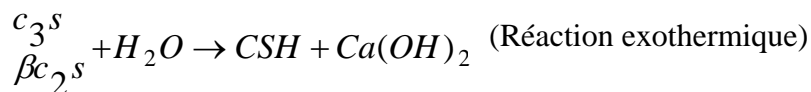
**Chapitre IV****DESCRIPTION DE L'HYDRATATION*****1- L'hydratation du ciment et processus de formation de la pâte du ciment :***

La réaction de l'hydratation englobe tout un cortège de réactions indépendantes, et de cinétiques différentes, au cours desquelles les grains de ciment anhydre initiaux sont progressivement dissous, en même temps que se forme de nouvelles entités plus au moins bien cristallisées ayant incorporé des molécules d'eau dans la structure.

***1-1- Hydratation des silicates :***

Au contact de l'eau, les silicates se dissolvent. Un premier type se précipite, les silicates anhydres étant plus solubles que ces hydrates, ils vont sursaturer la solution et causer la précipitation d'autres hydrates.

Les réactions chimiques peuvent être sous la forme suivante <sup>11</sup> :



CSH : silicate de calcium hydraté.

Ca(OH)<sub>2</sub> : portlandite.

De point de vue de leur morphologie, on est amené à distinguer trois ou quatre types de CSH selon la période de l'hydratation à laquelle on se place : les CSH I et II cristallisent les premiers dans l'espace disponible entre les grains anhydres ; les CSH III et IV sont tardifs et peuvent occuper la place des grains anhydres originaux.

**I-2 Hydratation des aluminates :**

de la réaction de l'eau et de  $C_3A$  serait quasi-instantané et violente si elle n'était pas retardée par l'ajout de gypse <sup>11</sup>



$C_3A, 3CaSO_4, 32H_2O$  : Ettringite

Le produit obtenu est le trisulfo-aluminate de calcium hydraté ou ettringite, qui cristallise sous forme d'aiguille caractéristique. La réaction entre l'eau et le  $C_4AF$  aboutit aux mêmes produits qu'avec  $C_3A$ , en substituant aux aluminates des alumino-ferrite.

**I-3- Déroulement cinétique du processus :**

trois grandes étapes sont à distinguer <sup>11</sup> :

1. *A l'état frais*, les grains de clinker et de gypse sont isolés, en suspension dans la phase liquide connexe constituée par l'eau. Autour de ces grains de ciment anhydre se forme une couche protectrice d'un gel CSH.
2. *La prise* marque le passage quasi-instantané d'un état de suspension dense des particules plus au moins dispersées à un état solide continu. Selon la théorie de la percolation <sup>12</sup>, la couche de gel de CSH qui entoure les grains se rompt, laissant place à la précipitation de la portlandite (cette précipitation consomme brutalement des  $Ca^{2+}$  et OH, la dissolution des constituants du ciment est alors accélérée) et d'un CSH fibreux secondaire ; Cette croûte d'hydrates ; croissant à la périphérie des grains isolés, rompt la connexité de la phase liquide par agglomération de ces derniers, jusqu'à ce que naisse un premier réseau de particules connectées.
3. *La période de durcissement* : les réactions d'hydratation se poursuivent, selon une cinétique ; cependant elles se ralentissent rapidement. Les grains de ciment anhydre s'hydratent en premier lieu de façon concentrique sur leur surface, les CSH ainsi créés forment une croûte périphérique croissante. Par suite, l'enchaînement des hydrates ralentit la réaction d'hydratation en rendant de plus en plus difficiles et de plus en plus longs les phénomènes de transfert de l'eau intergranulaire vers les grains de ciment anhydre sous-jacents.

La présence simultanée des différents anhydres tend à modifier légèrement la cinétique des mécanismes élémentaires présentés plus haut.

## **II- Comportement de la structure de la pâte de ciment :**

Le comportement mécanique de la pâte de ciment est gouverné par l'arrangement de ces différents constituants :

### **II-1- Les CSH**

Les particules solides de CSH, de taille colloïdale, forment un gel amorphe (structure nanocristalline amorphe de CSH), et ont une structure constituée de feuillet très mince dont l'épaisseur moyenne est de 30 Å et dont l'écartement est d'environ 17 Å, s'enroulant sur eux-mêmes en formant des tubes creux.

Divers modèles de l'unité structurale du gel de CSH fondé sur des constatations indirectes, visent à reproduire ses évolutions et à les corrélérer avec la manifestation mécanique macroscopique du matériau, et notamment sous charge. Ces modèles sont décrits par DELAHAIE <sup>11</sup>.

### **II-2. La porosité :**

La porosité totale du ciment, i.e. le volume des vides qu'elle contient rapporté à son volume total, est essentiellement bimodale : on distingue ainsi les pores capillaires (dont la dimension est de quelques centaines d'ångströms) et les pores des hydrates (de taille manométrique <sup>11</sup>), ces différents pores étant interconnectés.

### **II-3- Etat de l'eau dans la pâte de ciment durcie :**

Une classification classique consiste à distinguer trois types d'eau <sup>11,12,6</sup>

- L'eau chimiquement liée : cette eau est combinée aux hydrates sous forme d'eau de solvation ou de cristallisation. Elle n'est plus considérée comme faisant partie de la phase liquide des matériaux.
- L'eau adsorbée : elle est constituée par les premières couches de molécules d'eau soumises au champ des forces électriques superficielles des particules de CSH. Selon que l'énergie de ces forces de liaison est forte ou faible, on parle d'eau physico-adsorbée (la physisorption met en jeu des liaisons par force intermoléculaires d'attraction, correspondant à des énergies relativement faibles) ou de chimisorbée (la chimisorption met en jeu un transfert d'électrons, d'un processus mettant en jeu une énergie de quelques centaines de kJ/mol).  
Par ordre décroissant d'énergie de liaison avec le solide, SIERRA <sup>11</sup> distingue :

- A. L'eau hydroxylique : liée aux atomes Si ou Ca
- B. L'eau interfoliaire elle intervient dans la cohésion intrinsèque de la lamelle et est fixée entre les feuillets par des ponts d'hydrogène
- C. L'eau adsorbée interlamellaire soumise au champ de forces créé par les lamelles.

- L'eau libre : cette eau échappe aux forces superficielles des particules solides. En excès à l'eau nécessaire à l'hydratation, elle occupe les pores capillaires. Elle est la première à migrer et s'éliminer lors de ressuage et, surtout, de la dessiccation, lorsque les changes hygrométriques sont permis avec le milieu ambiant.

### **III- Caractérisation de l'évolution du matériau : Le degré d'hydratation :**

**III-1- Définition :** On définit le degré d'hydratation comme étant le rapport entre la masse de réactif hydraté et la masse initial de réactif(ou fraction massique des réactifs qui s'est hydraté).

#### **III-2- Détermination du degré d'hydratation :**

La détermination du degré d'hydratation est généralement fondée sur des méthodes chères aux chimistes.

- Une première approche consiste à déterminer le degré d'hydratation globale  $\alpha$  comme étant la moyenne pondérée par leurs fractions massique des degrés d'hydratation  $\alpha_i$  de chaque composant du clinker. Il est facile de déterminer indirectement  $\alpha_i$  à partir de leur complément, qui est la fraction non hydratée  $x_i=1-\alpha_i$  de structure cristallisée.
- On peut également atteindre ce degré d'hydratation de la façon suivante<sup>11</sup> :

$$\alpha = \frac{E_x(t)}{E_x(\infty)}$$

$E_x(t)$  est la quantité d'eau liée chimiquement à l'instant t, par hydratation

$E_x(\infty)$  est la quantité d'eau liée pour une hydratation totale du ciment.

### **IV- Evolution des propriétés mécaniques :**

L'évolution physico-chimique progressive de la microstructure du matériau, consécutive à la progression de la réaction d'hydratation, entraîne un durcissement du matériau qui se traduit, à l'échelle macroscopique, par une évolution des propriétés mécaniques(module d'YOUNG et résistance) avec le temps. Le durcissement est donc la manifestation d'un vieillissement du matériau.

**V- Notion de maturité :**

Elle est définie comme étant l'âge théorique (on peut aussi parler de temps équivalent) au bout duquel P (propriété mécanique) aurait atteint, sous une température de référence  $T^*$  constante (souvent égale à 293 K) la même valeur que dans les conditions réelles de température auxquelles le matériau a été soumis.

Comme c'est le cas pour un nombre de réactions chimique, la cinétique d'hydratation répond assez bien à la loi d'ARRHENIUS [REGOURD et al]. 1980). Dans ce cadre la maturité s'écrit de la façon suivante :

$$u(t) = \int_{t_0}^t \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T^*} - \frac{1}{T(s)}\right)\right] ds \quad (4.1)$$

Où  $E_a$  : est l'énergie d'activation de la réaction d'hydratation.

R : est la constante universelle des gaz parfaits ( $8.3144 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ).

T(s) : est la température du matériau à l'instant s (en K) la valeur de  $t_0$  est prise à la fin de malaxage.

## Chapitre V :

### RETRAIT

---

#### I- Introduction :

Le retrait est le raccourcissement du matériau, il se décompose comme suit :

- Le durcissement de la pâte de ciment s'accompagne de variations dimensionnelles qui apparaissent dès les premières réactions chimiques. Elles suivent le mouvement de l'eau et de son absorption par hydratation du ciment, et qui peuvent être au cours des premières heures un gonflement, mais qui se traduisent, en général, par volume final apparent décroissant. Nous appelons ce type de déformation le retrait endogène (d'auto dessiccation ou d'hydratation).
- Le retrait qui peut être causé par la différence entre la température à l'intérieur du béton, qui peut être occasionnée après la réaction chimique de l'eau avec les composants du ciment (réaction exothermique) et la température du milieu environnant, est appelé retrait thermique ; celui-ci est fonction de l'écart de température et du coefficient de dilatation du matériau.
- Outre les phénomènes endogènes les variations hygrométriques du milieu extérieur provoquent le retrait de dessiccation ou retrait de séchage, particulièrement avant prise du béton. Ce type de retrait est aussi accentué par une ventilation.
- Le retrait total est la somme algébrique des types de retrait.

Pour une évaluation forfaitaire de retrait final les valeurs usuelles s'appliquent <sup>10</sup> :

- \*  $1.5 \cdot 10^{-4}$  dans les climats très humides.
- \*  $2 \cdot 10^{-4}$  en climat humide.
- \*  $3 \cdot 10^{-4}$  en climats tempérés.
- \*  $4 \cdot 10^{-4}$  en climats chaud et sec.
- \*  $5 \cdot 10^{-4}$  en climats très secs ou désertiques.

Dans le cas ou :

1. La cinétique de phénomène intervient.
2. Le retrait au jeune âge a des effets mécaniques importants.
3. Lorsqu'une plus grande précision est demandée

Alors le calcul est mené de la façon suivante :

a) *Retrait endogène* : la cinétique de retrait endogène dépend de la vitesse de la réaction d'hydratation. Nous pouvons la quantifier en prenant en compte la vitesse de durcissement du matériau. Le rapport  $f_c(t)/f_{c28}$  (maturité du béton jeune) est pris comme variable de contrôle avant 28 jours. Nous adoptons les formules exposées dans <sup>10</sup>.

- pour  $t < 28$  jours :

$$\text{Si } f_c(t)/f_{c28} < 0.1, \quad \text{alors : } \varepsilon_{Re}(t, f_{c28}) = 0$$

$$\text{Si } f_c(t)/f_{c28} \geq 0.1, \quad \text{alors } \varepsilon_{re}(t, f_{c28}) = (f_{c28} - 20) \left( 2.2 \frac{f_c(t)}{f_{c28}} - 0.2 \right) 10^{-6} \quad (5-1)$$

1)

$\varepsilon_{re}$ : est le retrait endogène effectué entre la prise du béton et l'instant  $t$  (exprimé en jours).

$f_c$ : la résistance caractéristique du béton en compression au même instant.

Pour une description plus fine de cinétique de retrait endogène avant 28 jours, on pourra adopter une loi hyperbolique de durcissement calibrée sur les données expérimentales de résistance disponible.

- Pour  $t \geq 28$  jours :

$$\varepsilon_{re}(t, f_{c28}) = (f_{c28} - 20) \left( 2.8 - 1.1e^{-\frac{t}{96}} \right) 10^{-6}. \quad (5-2)$$

b) *Retrait de dessiccation* : la cinétique du retrait de dessiccation est généralement plus lente. Ce retrait dépend de la différence entre l'hygrométrie interne et l'humidité du milieu environnant  $\rho_h$ . L'avancement du processus varie avec la quantité  $(t-t_0)/r_m^2$  où  $t$  est âge du béton à l'instant considéré,  $t_0$  âge à partir duquel la dessiccation commence, et  $r_m$  le rayon moyen de la pièce. Les formules permettant d'évaluer le retrait de dessiccation sont les suivantes <sup>10</sup>.

- *Béton sans fumée de silice* :

$$\varepsilon_{rd}(t, t_0, f_{c28}, r_m, \rho_h) = \frac{k(f_{c28})(72e^{(-0.46f_{c28})} + 75 - \rho_h)}{1 + 8.4 \frac{r_m^2}{t - t_0}} 10^{-6}. \quad (5-3)$$

- Béton avec fumée de silice :

$$\varepsilon_{rd}(t, t_0, f_{c28}, r_m, \rho_h) = \frac{k(f_{c28})(72e^{(-0.46f_{c28})} + 75 - \rho_h)}{1 + 2.8 \frac{r_m^2}{t - t_0}} 10^{-6}. \quad (5-4)$$

Avec:  $k(f_{c28})=18$  si  $40\text{MPa} \leq (f_{c28}) \leq 57 \text{MPa}$ .  
 $k(f_{c28})=30-0.21 f_{c28}$  si  $(f_{c28}) \geq 57 \text{MPa}$ .

- c) *Retrait total* : dans les cas courants, on prend en compte la réduction du retrait due à la présence d'armatures, par le taux d'armatures dans la direction considérée  $\rho_s$ . Le retrait total s'effectue entre la prise du béton et une date donnée :

$$\varepsilon_{ret} = \frac{\varepsilon_{re} + \varepsilon_{rd}}{1 + \eta \rho_s}. \quad (5-5)$$

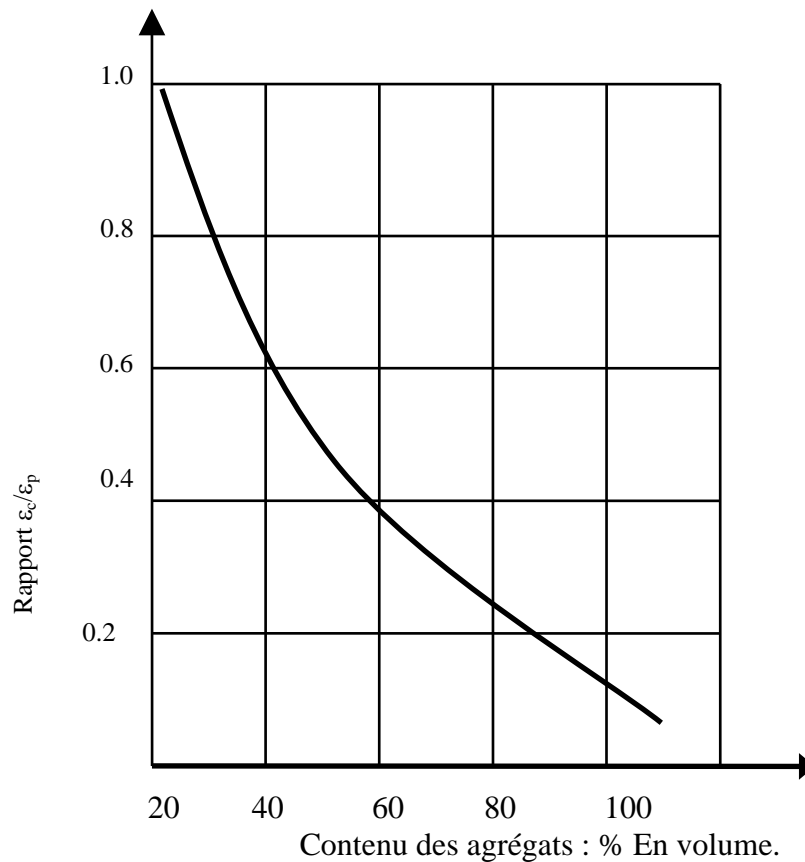
Ou  $\eta=15$  lorsque  $40 \leq f_{c28} \leq 60$ .

Et  $\eta=9$  lorsque  $60 \leq f_{c28} \leq 80$ .

Le retrait s'effectuant entre deux dates  $t$  et  $t'$  est égal à la différence des retraits totaux calculés à chaque date  $\Delta\varepsilon_{ret}(t, t') = \varepsilon_{ret}(t') - \varepsilon_{ret}(t)$ .

## II- Les facteurs influençant le retrait :

- 1) *Le contenu en agrégats* : Le rapport du retrait de béton  $\varepsilon_c$ , sur le retrait de la pâte  $\varepsilon_p$ , dépend du contenu en agrégats comme le montre la figure (5-1)<sup>15</sup> :



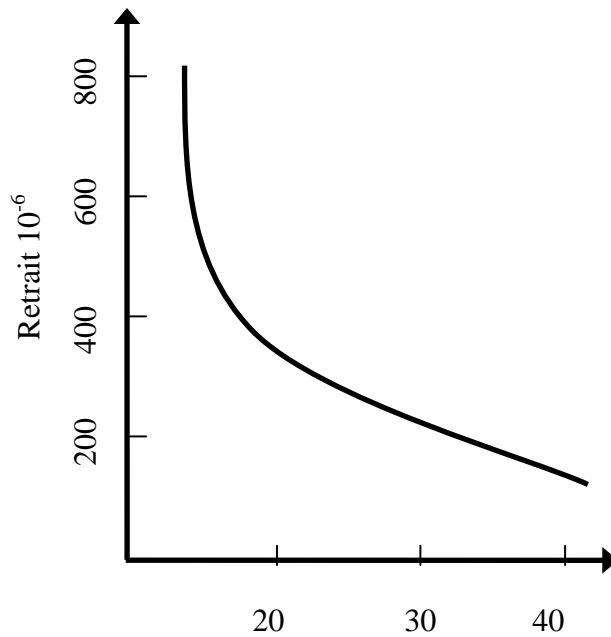
**Fig.5-1: Le rapport  $\epsilon_b/\epsilon_p$  en fonction des % en volume des agrégats.**

Une augmentation de contenu en agrégats (le dosage en agrégats détermine le contenu en pâte de ciment qui cause le retrait) entraîne une diminution en pâte de ciment et donc réduit le retrait.

La granulométrie et les dimensions des agrégats ont une influence sur la quantité d'eau de gâchage (pour assurer une certaine maniabilité), cette quantité a des effets directs sur le retrait. Plus la quantité d'eau est grande, plus le retrait est grand.

Les propriétés élastiques des agrégats déterminent le degré de limitation de retrait.

Une corrélation entre le retrait et le module d'élasticité du béton qui dépend de la compressibilité des agrégats a été établie comme dans la figure (5-2)<sup>3,14</sup> :

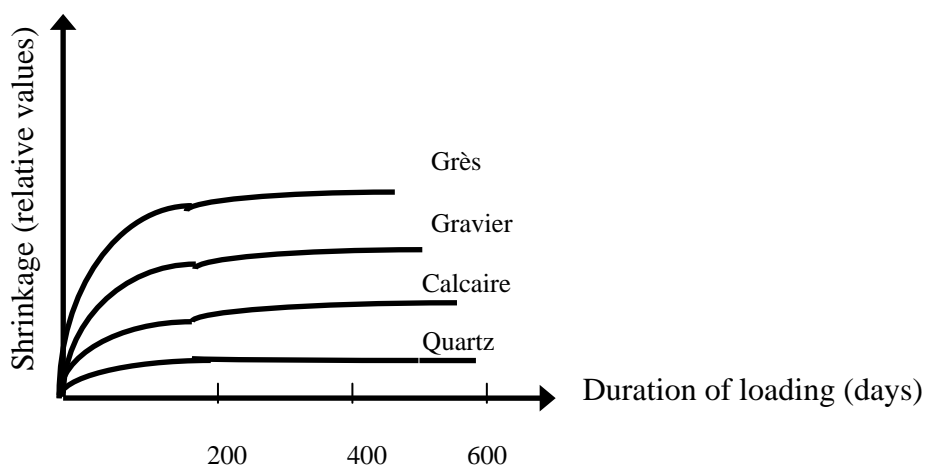


**Fig.5-2 : Retrait en fonction de module d'élasticité<sup>3,14</sup>**

Module sécant(GPa)

Les agrégats contenant une enveloppe d'argile peuvent aggraver le retrait d'une façon appréciable(jusqu'à 70%).

Les retraits des bétons faits des mêmes proportions(même composition), mais avec différents types d'agrégats sont illustrés à la figure (5-3)<sup>3,15</sup> :



**Fig.5-3 : Effects of type of aggregates on shrinkage**

Les bétons faits d'agrégats ne subissant pas de retrait ont des retraits faibles.

Les retraits élevés seront causés par l'utilisation d'agrégats exhibant des changements de volume appréciable suite à des cycles de mouillage et de séchage.

D'une manière générale le retrait de béton est réduit en utilisant des agrégats ayant un module d'élasticité élevé et qui sont durs et denses.

2) **Le contenu en pâte de ciment :** Il affecte le retrait du fait qu'il réduit le volume des agrégats.

Le dosage en eau est plus important dans les mortiers riches en ciment, le retrait peut passer de  $500\mu/m$  à  $700\mu/m$  pour des E/C de 0.3 à 0.5 respectivement. Ceci s'explique par le fait que la pâte de ciment est la partie génératrice de retrait dans une composition de béton.

Le tableaux (5-1) montre que le retrait augmente avec le dosage en ciment :

E/C	0.5	0.8
250kg/m <sup>3</sup> (dosage faible)	200( $\mu m/m$ )	250( $\mu m/m$ )
E/C	0.4	0.7
350 kg/m <sup>3</sup> (dosage moyen)	280( $\mu m/m$ )	200( $\mu m/m$ )
E/C	0.3	0.45
450 kg/m <sup>3</sup> (dosage fort)	300( $\mu m/m$ )	350( $\mu m/m$ )

**Tableau 5-1 : Le retrait en fonctions de dosage en ciment.**

Un béton fortement dosé en ciment exhibe plus de retrait pour un faible changement de E/C.

3) **La Composition chimique** : les conclusions concernant son effet sur le retrait sont contradictoires.

Certains travaux reportent une nette influence de ce paramètre sur le retrait de bétons, d'autres chercheurs pensent que la composition chimique d'un ciment influe très peu sur le retrait d'un béton, toutefois augmenter la surface spécifique d'un ciment ou sa finesse ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) a tendance à augmenter le retrait d'une façon appréciable puisqu'elle demande plus d'eau.

4) **Précaution** : pour limiter le retrait final nous devons :

- utiliser des agrégats propres et pas trop fins.
- Eviter d'utiliser des ciments trop fins.
- Adopter un dosage minimum du ciment compatible avec la résistance souhaité.
- Utiliser le minimum possible d'eau de gâchage.
- Diminuer l'évaporation au maximum, surtout pendant les premières heures, en maintenant humide la surface du béton jeune.
- Eviter les variations brusques d'épaisseur de la pièce.
- Repartir le ferrailage en utilisant des armatures de faible diamètre.
- Prévoir la libre contraction du béton (joint de dilatation).

### **III- Le retrait des BHP :**

Nous résumons les différents retraits des BHP en commençant par ordre chronologique d'apparition.

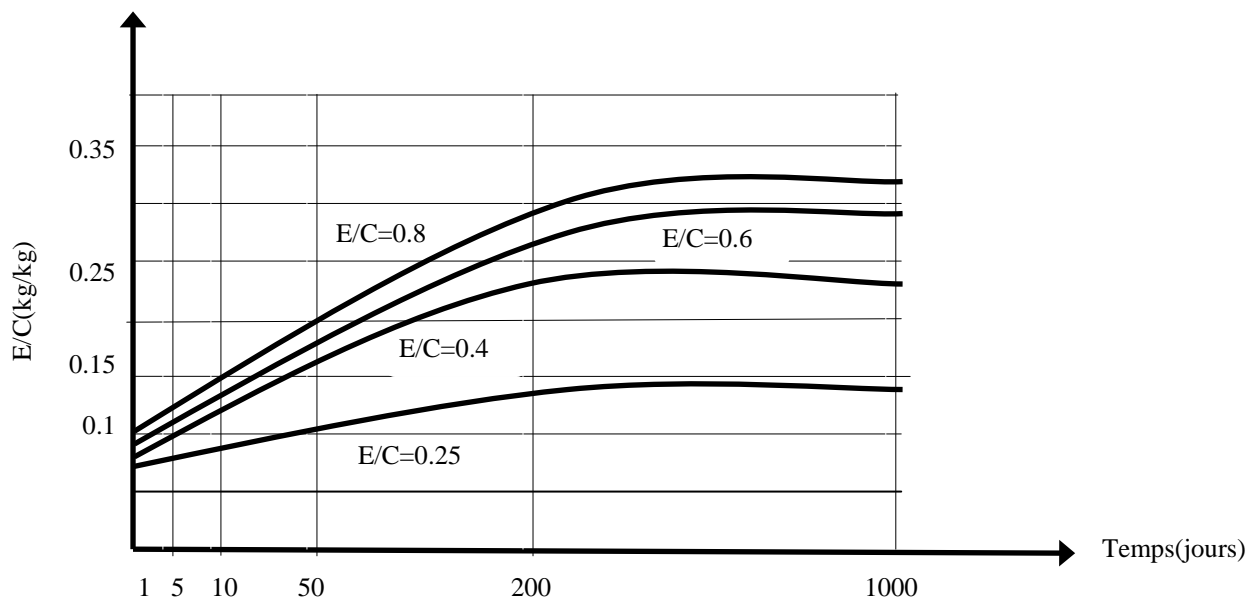
#### **III-1. Le retrait plastique :**

Le retrait plastique est causé par un départ prématuré de l'eau de gâchage, en général à partir de la surface du béton. Du fait de la faible quantité d'eau initiale et de l'absence de ressuage, les BHP sont peu affectés par ce phénomène. D'une manière générale le séchage avant prise peut provoquer des fissures de plusieurs centimètres de profondeur, si aucune précaution n'est prise. Il est donc indispensable de procéder à une cure soignée immédiatement après la mise en œuvres du béton <sup>12</sup> (produit spécifique mais dont l'efficacité aura été préalablement testée, aspersion d'eau, toile de jute humide, etc.).

#### **III-2. Le retrait thermique :**

Il est directement lié à l'élévation de température du matériau et à la valeur du coefficient de dilatation thermique.

La composition du ciment et sa finesse, le dosage en ciment, le rapport de la masse d'eau à la masse de liant ( $E/C$ ,  $E/(C+S)$ ), et le dosage en fumée de silice ont une grande influence sur l'élévation de température. L'augmentation de la quantité de ciment augmente la quantité de la chaleur. Cependant, la réduction du rapport  $E/C$  ou  $E/(C+S)$  diminue la quantité totale de la chaleur dégagée du fait de la réduction du degré d'hydratation final <sup>12</sup>. A titre d'exemple, la figure (5-4) présente l'évolution de la quantité relative liée en fonction du temps pour différentes valeurs de  $E/C$ .



**fig.5-4: Evolution de la quantité relative d'eau liée en fonction du temps pour différentes valeurs de  $E/C$ .**

Pour les BHP, nous avons les deux effets (dosage très fort de ciment et une réduction de  $E/C$ ) combinés dont ils étaient l'objet de travail réalisé par LE ROY <sup>12</sup>. Les conclusions montrent que l'effet de l'augmentation du dosage en ciment est plus important que l'effet contraire dû au faible rapport de l'eau au liant.

La plus grande cinétique du durcissement des BHP provoque des élévations de température plus importantes, par le fait que la diffusion de la chaleur vers l'extérieur est moins rapide que la production de celle-ci <sup>10,11,12</sup>. En conséquence les effets deviennent non négligeables à partir d'épaisseur de 40cm (exemple : Pont d'Elorn où on a enregistré 70°C après une quarantaine d'heures de coulage).

**III-3. Le retrait endogène  $RE$  :** L'amplitude du retrait endogène des bétons ordinaires est souvent inférieure à  $60 \cdot 10^{-6}$  <sup>11</sup>, mais depuis quelques années, on constate des valeurs à long

terme pouvant atteindre  $150 \cdot 10^{-6}$  <sup>12</sup>. Ces valeurs semblent surestimées du fait de la non-réduction d'un retrait thermique ou à cause d'un manque d'étanchéité des parois protectrices, qui doivent normalement empêcher la dessiccation.

### **1. Origine physico-chimique et mécanisme :**

L'eau de gâchage est progressivement consommée pour former des hydrates durant l'hydratation. Or, cette hydratation présente un bilan volumique négatif : le volume molaire des hydrates est inférieur (de l'ordre de 8 à 12% [BULL 1979] <sup>12</sup>) à la somme des volumes molaires des constituants (eau et ciment anhydre) consommés. Ce retrait se trouve gêné par le squelette, de plus en plus rigide : le liquide ne pouvant plus occuper tout le volume qui lui est offert, il y a alors cavitation (apparition de bulles de gaz) dans la phase liquide et apparition d'un réseau gazeux rapidement connecté dans les pores. La coexistence des deux phases entraîne la formation de ménisques à l'interface liquide/gaz, et donc l'apparition de tension capillaire. Les tensions qui existent dans la phase liquide capillaire (équilibre hydrostatique) doivent être équilibrées mécaniquement par une contraction de la matrice minérale qui se traduit par un raccourcissement isotrope au niveau de l'éprouvette qui constitue le retrait d'autodessiccation (retrait d'hydratation ou retrait endogène) qui est exactement la déformation libre que subit le matériau en cours de durcissement en conditions isotherme et en l'absence d'échange d'humidité avec le milieu extérieur.

L'examen de la littérature étrangère montre que le retrait endogène des BHP est très peu étudié. Quelques travaux tentent de relier le retrait à la composition du matériau, mais il s'agit toujours de retrait total.

### **2. Méthode d'homogénéisation :**

Un des premiers chercheurs à appliquer cette technique a été PICKET <sup>12</sup>. Depuis lors, différents auteurs se sont intéressés à ce sujet <sup>11,12</sup>. Cependant les essais sur pâtes pures qui accompagnent ces différents travaux, ont été effectués avec dessiccation. Ce qui diminue la précision d'un modèle d'homogénéisation, si ce n'est pour prévoir l'amplitude à long terme (distribution uniforme de teneur en eau, donc de contrainte, dans l'échantillon).

### **3. Séparation des déformations dans un modèle simplifié de retrait :**

Les modèles actuels des règlements de calcul négligent complètement l'existence de l'autodessiccation, ce qui peut conduire à des erreurs plus au moins importantes sur les déformations, tant en amplitude qu'en cinétique. Donc si on veut éviter, à l'échelle de la structure, d'importants défauts de conception, due à la non prise en compte des déformations

à très jeune âge, il est primordial de prendre en compte l'autodessiccation. Même dans le cadre d'un modèle simplifié, le retrait des BHP doit être décomposé en une partie due à l'hydratation (retrait endogène) et une autre au séchage (retrait de dessiccation). Aucun modèle simplifié ne prend en compte l'autodessiccation, et le séchage de manière séparée. Donc, il est nécessaire de considérer de nouvelles approches, qui intègrent les particularités des BHP pour pouvoir modéliser ces retraits.

#### IV. Calcul du retrait par homogénéisation :

##### *IV-1 Modèle trisphère :*

Il est appliqué au calcul des amplitudes des retraits, ce modèle est le suivant :

- *Equation de base :*

$E_g$ ,  $E_p$  module instantané des granulats et celui de la pâte de ciment durci (PCD) respectivement.

$\phi(t)$  coefficient de fluage au temps  $t$  (rapport de la déformation de fluage à la déformation instantanée)

$E_d$  module différé de la PCD

$g$  concentration granulaire

$g^*$  concentration granulaire maximale

$\varepsilon_p$  amplitude finale du retrait endogène de la PCD

$U(r)$  déplacement radial

$\sigma_r, \sigma_\theta$  respectivement la contrainte radiale et orthoradiale

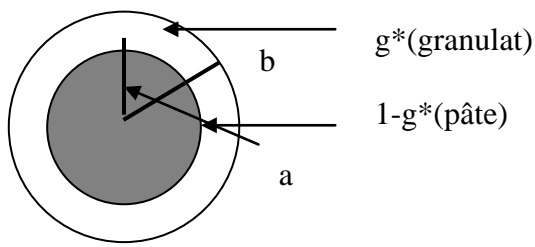
$R_{c28}$  classe vraie du ciment.

$$(1-g)/g^*$$

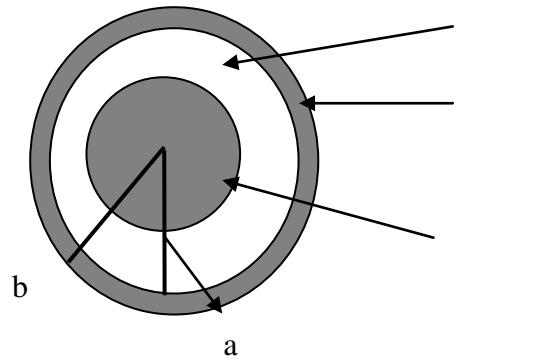
$$g$$

$$g/g^*(1-g^*)$$

**Fig.5-5 : Schéma de la cellule élémentaire de modèle trisphère.**



Cellule1 : Concentration maximale



Cellule1 : Concentration quelconque

La loi de comportement en élasticité est :

$$\underline{\varepsilon} - \varepsilon_1 = ((1+\nu)/E)\underline{\sigma} - \nu/E \text{ TR}(\underline{\sigma})\underline{1}$$

On fait maintenant intervenir la déformation différée,  $\varepsilon^{\text{diff}}$ , de la pâte de ciment, en faisant l'hypothèse de comportement viscoélastique linéaire.

En prenant la déformation différée asymptotique du type :

$$\varepsilon_{\infty}^{\text{diff}} = \frac{\phi}{E_p}$$

En combinant l'équation d'équilibre pour une sphère soumise à une pression hydrostatique, les déformations radiales et orthogonales en fonction du déplacement radial et la loi de comportement inversée, on établit l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2u}{r^2} = 0$$

La solution de cette équation est alors :

$$u = Ar + \frac{B}{r^2}$$

Où : A et B sont calculés en fonction des conditions aux limites.

- *Calcul pour une concentration quelconque* : L'expression ci-dessous permet de calculer le retrait endogène du béton, en fonction de celui de la pâte de ciment durci PCD, du module différé de la PCD, du module instantané des granulats, de la concentration granulaire maximale.

$$\varepsilon_b = \frac{\left(1 + \frac{E_d}{E_g}\right)\left(1 - \frac{g}{g^*}\right) + \frac{4 \frac{E_d}{E_g} (1 - g^*) g / g^*}{g^* + \frac{E_d}{E_g} (2 - g^*)}}{1 + \frac{g}{g^*} + \frac{E_d}{E_g} \left(1 - \frac{g}{g^*}\right)} E_p \quad (5-6)$$

- Expression simplifiée du retrait de béton :

$$E_b = \frac{u(b)}{b} = \frac{b-a}{b} \varepsilon_p = \left(1 - \sqrt[3]{g/g^*}\right) \varepsilon_p.$$

Cette formule s'obtient en écrivant la diminution de diamètre de la cellule est uniquement due au retrait de la pâte. Celle-ci étant fissurée radialement par retrait empêché, les contraintes radiales et orthoradiales sont amoindries par la fissuration, mais le retrait radial de la sphère extérieure reste complet et vaut  $\varepsilon_p$ . Comme le granulat ne suit aucune contrainte à cause de cette fissuration, la déformation de la cellule est égale au retrait de la pâte, pondérée par le rapport de l'épaisseur de matrice au rayon extérieur de la cellule. Ce rapport est exprimé par la suite en fonction de la concentration granulaire réelle.

#### IV-2 Modèle empirique pour le retrait de la pâte de ciment :

$$\varepsilon_p = 24 \frac{60}{f_{c28}} \left(1 - 1.47 \frac{e}{c}\right) \left(1 - 0.68 e^{-\left(\frac{11e}{c}\right)}\right) 9.5 \left[1 + 3.15 \frac{\frac{e}{c}}{1 + 0.15 \left(1 - e^{-\left(\frac{11s}{c}\right)}\right)}\right]^{2.4} + \frac{558 \frac{e}{c}}{1 + 1.74 \left(1 - e^{-\left(\frac{11s}{c}\right)}\right)}. \quad (5-7)$$

Cette formule est obtenue à partir du constat que le squelette solide de la PCD subit des contraintes de compression, sous l'effet des dépressions capillaires, selon une relation de type :

$$\Sigma_s(t) = P_c(t) \phi(t).$$

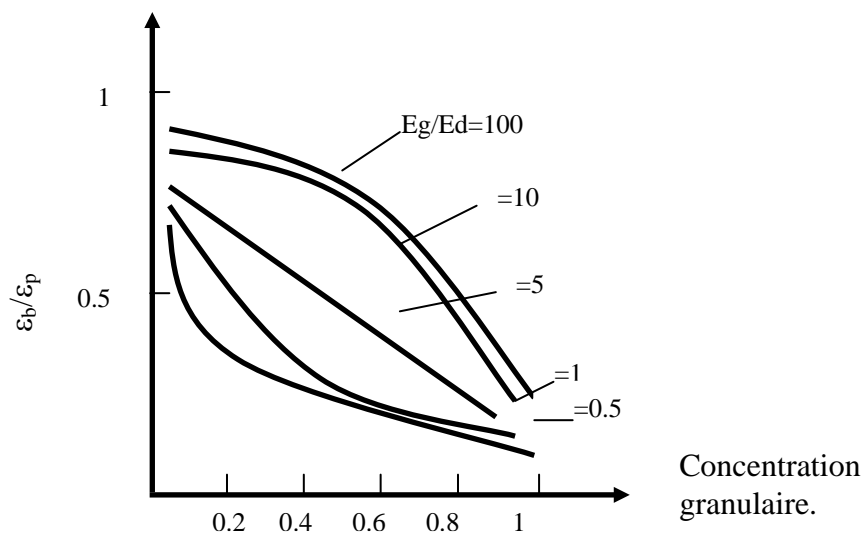
Où :  $P_c(t)$  est la dépression capillaire,  $\phi(t)$  la porosité du matériau, et  $\Sigma_s(t)$  la contrainte de compression du squelette solide (d'après l'analyse exposée par LE ROY<sup>12</sup>).

#### IV-3 La variation de l'amplitude finale du retrait du béton en fonction de la formulation :

On présente ici des travaux effectués par GUENOT et LE ROY<sup>11,12</sup>, dans lesquels on varie indépendamment chacun des paramètres de la formulation pris en compte par le modèle. Ces

calculs doivent être considérés comme une simple illustration pour quelques cas particuliers, car dans la réalité, plusieurs paramètres peuvent varier en même temps.

a) *Evolution en fonction de la concentration granulaire* : on a fait varier le rapport du module du granulat au module déformé de la pâte de ciment pour avoir l'évolution du retrait du béton à celui de la pâte de ciment.

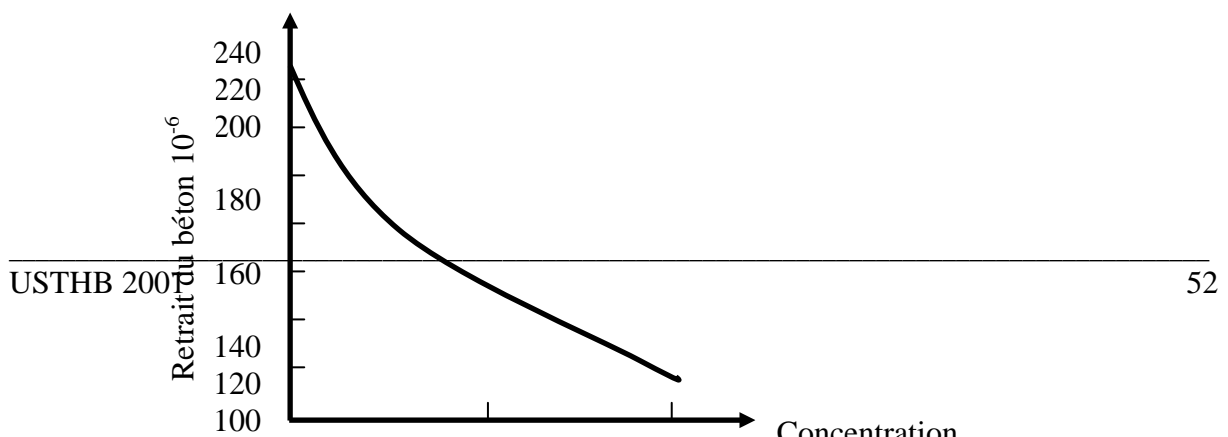


**Fig.5-6 : Evolution de rapport du retrait du béton à celui de la pâte,  $\epsilon_{b\acute{e}t}/\epsilon_{p\grave{a}t}$ , en fonction de la concentration granulaire, et pour différents  $E_g/E_d$  ( $g^*=87\%$ ,  $E_d=5000\text{Mpa}$ )**

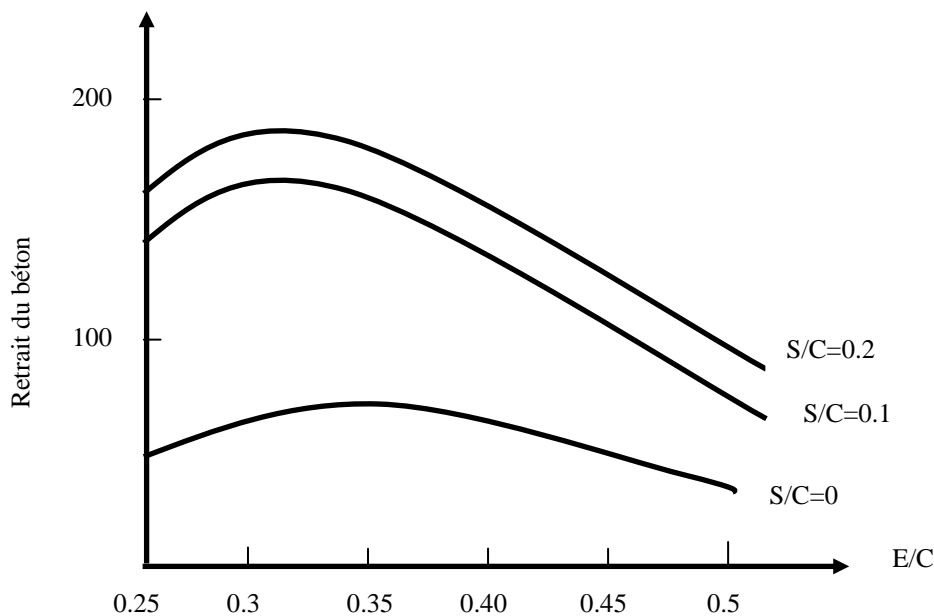
On remarque une inversion de concavité de la courbe lorsque le rapport des modules passe à l'unité 1.

On constate que, pour les granulats courants, le module d'élasticité a peu d'influence sur le retrait endogène du béton <sup>12</sup>.

Si on varie seulement la concentration granulaire, la décroissance est généralement bien traduite dans la figure(5-7).



b) Evolution en fonction de  $E/C$  : la figure (5-8) donne l'évolution du retrait en fonction de  $E/C$ , pour différentes valeurs de  $S/C$  :



**fig.5-8 : Evolution du retrait du béton en fonction du rapport  $E/C$ , pour différentes valeurs de  $S/C$ . Simulation réalisée pour  $g=0.71$**

L'évolution du retrait endogène du béton, pour un même squelette granulaire et un ciment donnés, a même tendance que pour la pâte pure. Mais le rapport  $E/C$  correspondant au maximum de retrait endogène est plutôt voisin de 0.3. En faisant varier les dosages de la pâte pure, à squelette granulaire et à ciment fixé, le retrait endogène couvre un domaine qui varie dans une proportion de 1 à 2.

c) *Effet de la nature du ciment :*

L'effet de la classe de ciment n'a pas été étudié. Concernant la composition chimique du ciment, LE ROY <sup>12</sup> définit l'amplitude du retrait endogène de la pâte pure en fonction du temps selon l'expression suivante :

Valable pour une concentration en gypse constante et en absence d'éléments soluble expansifs

$$\varepsilon_{re} = -0.12\alpha_{C_3S}(t)[C_3S] - 0.070\alpha_{C_2S}(t)[C_2S] + 2.256\alpha_{C_3A}(t)[C_3A] + 0.859\alpha_{C_4AF}(t)[C_4AF] \quad (5-8)$$

Les termes entre crochets sont les pourcentages pondéraux de chaque constituant principal du ciment anhydre, et les termes  $\alpha(t)$  donne le degré d'hydratation de chaque constituant, en fonction du temps.

Cette approche nécessite de connaître le degré d'hydratation final du ciment en fonction de la formulation de la pâte.

*En conclusion on peut dire que :*

- Le modèle tri sphère décrit correctement l'évolution des déformations en fonction de la concentration granulaire.
- À travers ce modèle on montre que le module du granulat à peu d'influence sur la déformation, pour les granulats courants ( $50 < E_g < 100$  GPa).
- Le modèle présente un maximum de retrait pour un rapport de 0.3. Pour des rapports e/c plus faible que celui correspond au maximum, on explique la diminution de retrait par une augmentation plus rapide de la rigidité de la matrice que celle de la sollicitation «hydrique».

Un calcul simplifié des contraintes de traction au sein de la matrice sous l'effet du retrait empêché par les granulats révèle que les BHP sont plus sujets à la fissuration interne que les BO<sup>12</sup>.

## **Chapitre VI**

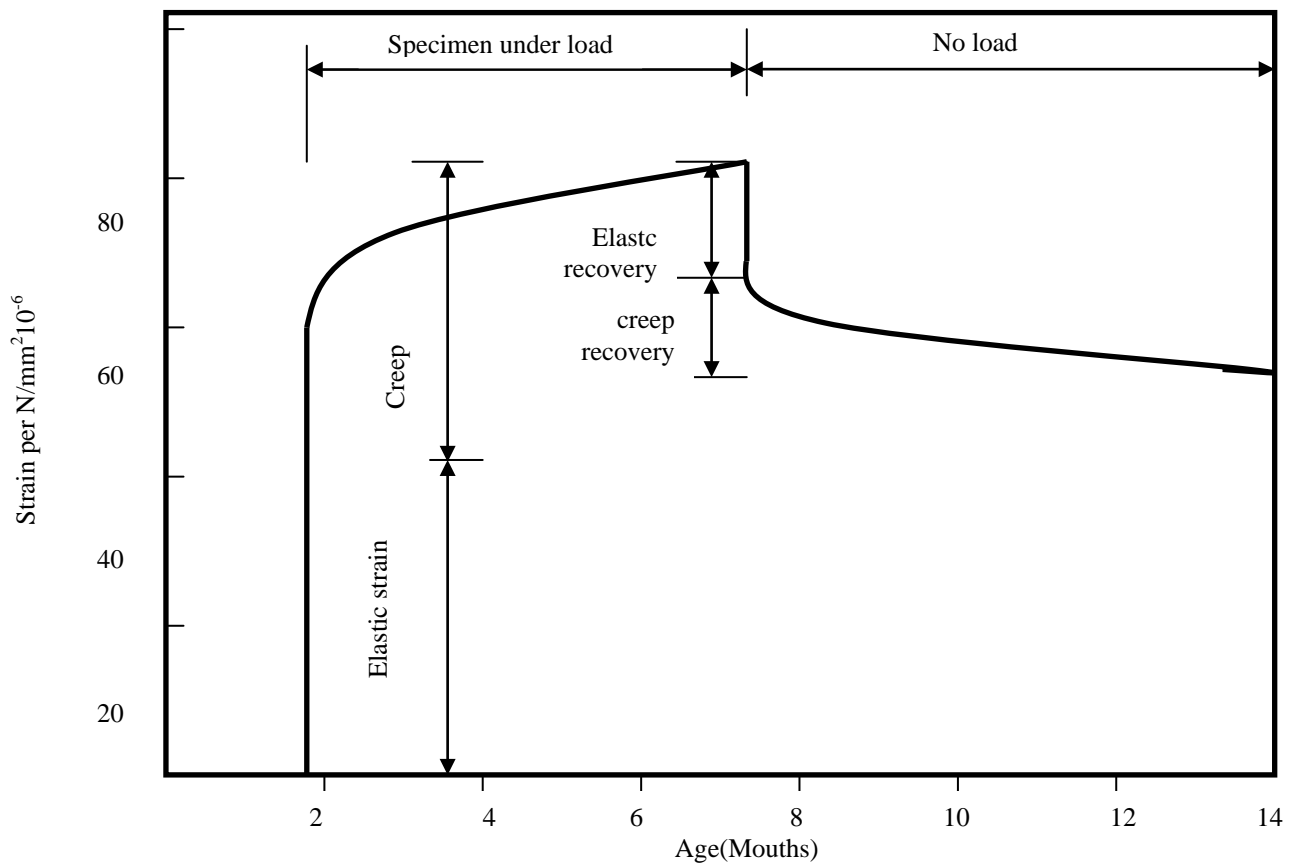
### **FLUAGE**

---

#### ***I- Concepts fondamentaux :***

Depuis l'apparition du document technique de WOOLSON en 1905, intitulé «Some remarkable tests indicating flow of concrete under pressure», plus d'un millier d'article de recherche ont été publiés sur le fluage du béton. Cependant le mécanisme du fluage est encore sujet à des controverses considérables. A citer de ACI committee 209 (the difficulty is that a satisfactory theory of creep must explain in a unified way the behaviour of concrete under various environmental conditions and under various states of stress... it is a hard to suggest definite conclusion on the mechanism of creep). Peut être la seule assertion non-convenable qui peut être faite est que la présence d'une certaine quantité d'eau évaporable est essentielle au fluage.

La figure (6-1) montre une courbe typique déformation-temps pour un spécimen en béton soumis à une contrainte de compression axiale n'excédant pas  $1/3 f_{cu}$ ,  $f_{cu}$  étant la contrainte caractéristique du béton à base de cube ; cette contrainte étant maintenue pour une période de temps puis enlevée.



**Fig.6-1 : courbe déformations-temps typique de béton**

On constate que la réponse du béton est à la fois immédiate et dépendante du temps. La déformation immédiate est la déformation élastique  $f_c/E_c$  où  $f_c$  est la contrainte appliquée et  $E_c$  le module de déformation induite par la charge. La déformation dépendante du temps est décomposée du fluage, déformation induite par la charge, et du retrait, déformation non induite par la charge. Le fluage se produit à un taux qui diminue avec le temps et peut continuer à se produire jusqu'à 30 ans, atteignant, éventuellement une magnitude de plusieurs fois la déformation élastique. En se déchargeant, il se produit une récupération immédiate, appelée récupération élastique, suivie par une récupération à long terme, appelée récupération par fluage.

### **I-1 Définitions :**

Le terme général de fluage désigne les déformations différées du béton sous l'effet des contraintes qui lui sont appliquées, le retrait étant, par convention, déduit des déformations différées totales.

Dans le cas où les déformations finales de fluage sont évaluées à l'aide d'un module de déformation à long terme incluant des déformations instantanées et différées, l'expression du module à prendre en compte est <sup>10,11,15</sup>

$$E_{vj} = \frac{11000}{1 + \phi} f_{cj}^{\frac{1}{3}} \quad (6-1)$$

Dans laquelle le coefficient le coefficient de fluage  $\phi$  prend les valeurs suivantes

- Si  $40 \leq f_{c28} \leq 60$  MPa  $\phi=2$ .
- Si  $60 \leq f_{c28} \leq 80$  MPa et pour un BHP sans fumée de silice  $\phi=1.5$ .
- Si  $60 \leq f_{c28} \leq 80$  MPa et pour un BHP avec fumée de silice  $\phi=0.8$ .

On constate que plus le béton s'améliore plus l'effet du fluage diminue d'ampleur.

Si on applique sur un béton non encore chargé, à l'âge  $t_1$ , une contrainte  $\sigma$  que l'on maintient constante, on peut admettre que la déformation du fluage, à un instant donné, est proportionnelle à la contrainte  $\sigma$ , tant que cette contrainte reste inférieure à environ  $0.6 f_{cj0}$ .

Par ailleurs, le fluage peut se décomposer en deux parties.

- Fluage propre qui apparaît lorsque le béton n'échange pas d'humidité avec milieu environnant, ce phénomène est en principe indépendant de la taille de la pièce.
- Fluage de dessiccation qui est un supplément de fluage lié au séchage du béton pendant le chargement, et dépend des dimensions de la structure.

Le fluage peut être exprimé comme suit <sup>10,35</sup>:

### **I-1-1- Fluage propre :**

a) Béton sans fumée de silice :

$$\varepsilon_{ip}(t, t_1, f_{c28}, E_{i28}, \sigma) = 1.4 \frac{\sigma}{E_{i28}} \frac{\sqrt{t-t_1}}{(\sqrt{t-t_1} + 0.40 e^{\frac{3.1 f_c(t_1)}{f_{c28}}})} \quad (6-2)$$

b) Béton avec fumée de silice :

$$\varepsilon_{ip}(t, t_1, f_{c28}, E_{i28}, \sigma) = \frac{3.6}{f_c(t_1)^{0.37}} \frac{\sigma}{E_{i28}} \frac{\sqrt{t-t_1}}{(\sqrt{t-t_1} + 0.37 e^{\frac{2.8 f_c(t_1)}{f_{c28}}})} \quad (6-3)$$

L'amplitude finale du fluage propre dépend de la contrainte appliqué  $\sigma$ , du module élastique à 28 jours du béton  $E_{i28}$  de la résistance du béton au moment de chargement  $f_c(t_1)$ . La cinétique est d'autant plus rapide que le béton est chargé jeune et qu'il contient de fumée de silice. La cinétique est fonction de la maturité du matériau au moment du chargement, exprimée par le rapport  $f_c(t_1)/f_{c28}$  où  $t_1$  étant l'âge de chargement.

**I-1-2- Fluage de dessiccation :**

Le fluage de dessiccation est abordé par référence au retrait de dessiccation qui se produit pendant le chargement.

On constate que les BHP avec fumée de silice ont un fluage de dessiccation très faible <sup>11</sup>, voir négligeable <sup>10</sup>.

a) *Bétons sans fumée de silice :*

$$\varepsilon_{fd}(t, t_0, t_1, f_{c28}, \rho_h, r_m, \sigma) = 3.2[\varepsilon_{rd}(t, t_0, f_{c28}, r_m, \rho_h) - \varepsilon_{rd}(t_1, t_0, f_{c28}, r_m, \rho_h)]10^3 \frac{\sigma}{E_{i28}}. \quad (6-4)$$

b) *Béton avec fumée de silice :*

$$\varepsilon_{fd}(t, t_0, t_1, f_{c28}, \rho_h, r_m, \sigma) = [\varepsilon_{rd}(t, t_0, f_{c28}, r_m, \rho_h) - \varepsilon_{rd}(t_1, t_0, f_{c28}, r_m, \rho_h)]10^3 \frac{\sigma}{E_{i28}}. \quad (6-5)$$

**I-1-3- Le fluage total d'un élément de structure :**

Comme pour le retrait, le fluage total s'obtient par addition des deux déformations élémentaires, en tenant en compte du gêne apporté par les armatures :

$$\varepsilon_{flu}(t, t_0, t_1, f_{c28}, f_c(t_1), \sigma, r_m, \rho_h, \rho_s) = \frac{\varepsilon_{fp} + \varepsilon_{fd}}{1 + \eta\rho_s} \quad (6-6)$$

Ou :  $\eta=15$  lorsque  $40 \leq f_{c28} < 60$  pa.

$\eta=9$  lorsque  $60 \leq f_{c28} \leq 80$  MPa.

**I-1-4- Méthode de superposition :**

Elle repose sur la viscoélasticité linéaire et consiste à admettre l'additivité des déformations de fluage par rapport aux contraintes appliquées.

Lorsque les contraintes sont croissantes dans le temps l'expérience <sup>12</sup> montre que les prévisions de cette méthode sont bien vérifiées. Par contre, en cas de diminution de contrainte, Le retour de fluage prédit est très supérieur à celui qui est mesuré.

Cette méthode n'est possible que si l'on suppose l'hygrométrie extérieure constante pendant le temps de chargement du béton.

**I-1-4-1- Succession d'accroissement de contrainte :**

Elle est utilisée si la diminution de contrainte est faible en valeur absolue ou relative ou si elle est suivie d'un déchargement significatif. Dans ce cas, on peut admettre de superposer l'effet de chaque variation de contrainte. La déformation de fluage au temps t est donnée par le bulletin des LCPC(mai 96) <sup>10</sup> :

$$\varepsilon_{fl} = \sum_{j=1}^n \varepsilon_{fl}(t, t_0, t_j, f_{c28}, f_c(t_j), \Delta\sigma_j, r_m, \rho_h, \rho_s) \quad (6-7)$$

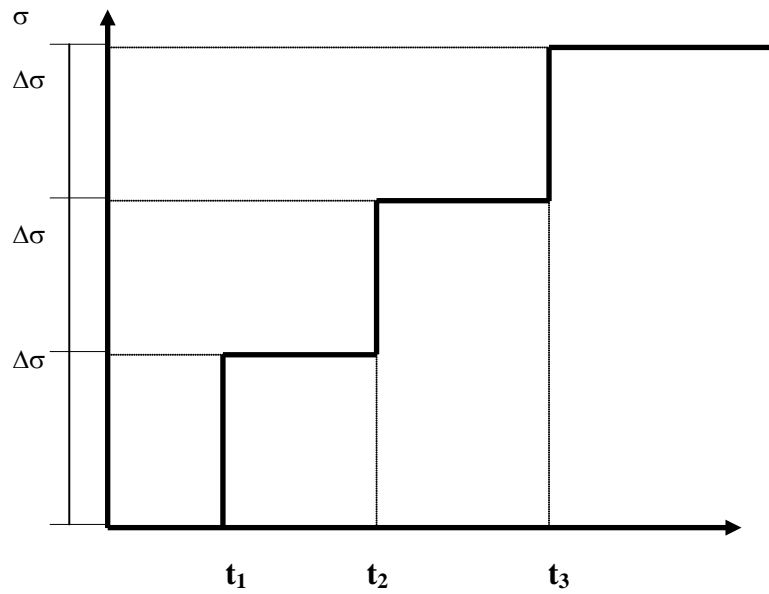


Fig.6-2 :Accroissement des contraintes

Où les variations de contrainte  $\Delta\sigma_j$  sont appliquées au temps  $t_j$ .

**I-1-4-2- Diminution de contrainte - retour de fluage :**

Cette méthode est appliquée en cas de chargement important et définitif, dans le cas où l'on appliquerait d'abord une contrainte  $\sigma_1$  à l'âge  $t_1$  puis une décharge partielle  $\Delta\sigma_2$  à l'âge  $t_2$ . Les variations des contraintes étant comptées positivement dans le sens d'un accroissement de contraintes,  $\Delta\sigma_2$  est négative. La contrainte résiduelle est donnée par  $\sigma_2 = \sigma_1 + \Delta\sigma_2$

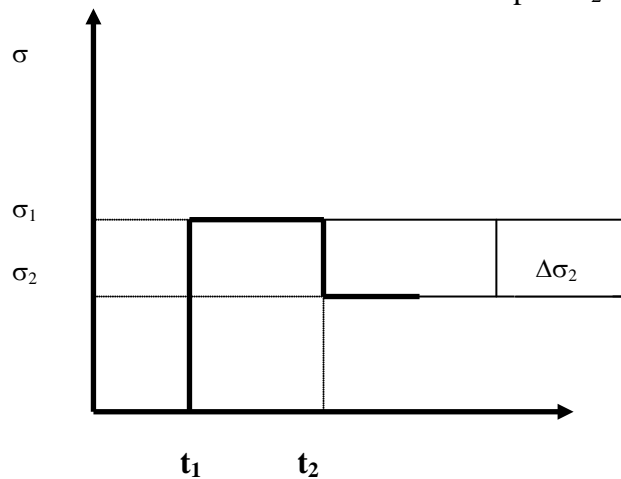


Fig.6-3 : retour de fluage

- La déformation de fluage au temps  $t$  due à  $\sigma_2$  :

$$\varepsilon_{flu} = \varepsilon_{flu}(t, t_0, t_1, f_{c28}, f_c(t_1), \sigma_2, r_m, \rho_h, \rho_s)$$

- La déformation de fluage due à l'effet d'une contrainte ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) appliqué pendant

$$\varepsilon_{fl1} = \varepsilon_{flu}(t_2, t_0, t_1, f_{c28}, f_c(t_1), \sigma_1 - \sigma_2, r_m, \rho_h, \rho_s)$$

$$(t_1, t_2)$$

- la déformation dite retour de fluage dû à l'application de ( $\Delta\sigma_2 < 0$ ) à l'instant  $t_2$  qui se

produit dans l'intervalle de temps ( $t_2, t$ ) et qui négative est :

$$\varepsilon_{fl1} = \frac{\varepsilon_{flu}(t_2, t_2 - t, t_0, t_1, f_{c28}, f_c(t_2), \Delta\sigma_2, r_m, \rho_h, \rho_s)}{k_r(t_2 - t_1)} g(t - t_2)$$

Où  $K_r$  : fonction de la durée  $t_2 - t_1$  d'application de la contrainte.

$g(t - t_2)$  est la loi d'évolution du retour de fluage, qui varie de 0 à 1 lorsque la durée du chargement  $t - t_2$  varie de 0 à l'infini

$$k_r(t_2 - t_1) = 4\sqrt{\log(t_2 - t_1)} \text{ si } (t_2 - t_1) \geq 2 \text{ jours.}$$

$$k_r(t_2 - t_1) = 1 + 0.6(t_2 - t_1) \text{ si } (t_2 - t_1) < 2 \text{ jours.}$$

la durée d'application est comptée en jours

$$g(t_2 - t_1) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (t_2 - t_1)}}$$

#### **I-1-5- Méthode incrémentale :**

Elle est fondée sur une relation donnant la vitesse de déformation de fluage en fonction de :

- De la valeur de cette déformation déjà apparue.
- De la contrainte appliquée.
- Des autres paramètres décrivant l'état du béton.

Cette relation constitue, lorsque la contrainte et l'hygrométrie sont constantes, une équation différentielle de premier ordre.

Contrairement à la méthode de superposition, cette méthode permet de prendre en compte des variations d'hygrométrie en cours de chargement.

#### **I-1-5-1. Principe de la mise en œuvre :**

On fait l'hypothèse de continuité des déformations de fluage, et on se donne une famille de fonctions  $\phi(t, r_m, \rho_h, \rho_s, C)$  paramétrées par  $C$ , décrivant toutes les évolutions de  $\varepsilon_{fl(t)/\sigma}$  lorsque la contrainte  $\sigma$  est constante.

On considère le cas d'une  $\sigma_1$  et d'une hygrométrie  $\rho_{h1}$  constantes entre  $t_1$  et  $t_2$ , où  $\varepsilon_{fl1}$  est le fluage à l'instant  $t_1$  et l'évolution  $\varepsilon_{fl}(t)$  entre  $t_1$  et  $t_2$  puis on applique les étapes suivantes<sup>10</sup>.

- On résout l'équation suivante, où C est l'inconnu

$$\varepsilon_{fl1} = \sigma_1 \phi(t_1, r_m, \rho_h, \rho_s, C_1)$$

- On écrit pour tous les temps compris entre  $t_1$  et  $t_2$

$$\varepsilon_{fl} = \sigma_1 \phi(t, r_m, \rho_h, \rho_s, C_1)$$

La déformation de fluage est initiée à 0 avant l'application de tout chargement.

une partie des courbes est donnée par  $\varepsilon_{flu}(t, t_0, C, f_{c28}, f_c(c), 1, r_m, \rho_h, \rho_s)$  :

**I-1-5-2- Données de la fonction :**  $\phi(t, r_m, \rho_h, \rho_s, C)$

C : correspond à l'âge du béton au moment du chargement. On prendra pour valeur minimale de C la valeur C\* telle que  $f_c(c^*) = 10$  MPa.

Les courbes  $\varepsilon_{flu}(t, t_0, C, f_{c28}, f_c(c), 1, r_m, \rho_h, \rho_s)$  ont alors une limite supérieure égale à  $\varepsilon_{flu}(t, t_0, C^*, f_{c28}, 10, 1, r_m, \rho_h, \rho_s)$ , les courbes  $\phi(t, r_m, \rho_h, \rho_s, C)$  seront sous la forme<sup>10</sup> :

$$[1 - C + \frac{2}{3} Cg(t)] \varepsilon_{flu}(t, t_0, f_{c28}, 10, 1, r_m, \rho_h, \rho_s, )$$

Où g(t) a été définie auparavant, C qui n'est plus un temps, mais un simple paramètre sans signification physique particulière est alors négative<sup>10</sup>.

*Cas d'un chargement total :*

Si la contrainte appliquée diminue à  $t_1$  pour atteindre  $\sigma_1$  supposée petite devant la valeur précédente, l'équation à résoudre pour prédire la déformation de fluage est la suivante :

$$\varepsilon_{fl1} = [\sigma - \sigma_1 C + \frac{2}{3} \sigma_1 Cg(t_1)] \varepsilon_{flu}(t, t_0, f_{c28}, 10, 1, r_m, \rho_h, \rho_s, )$$

Le cas du chargement total ( $\sigma=0$ ) est simplement traité en considérant le produit  $\sigma_1 C = U_1$  comme nouveau paramètre. On a donc :

$$U_1 = \frac{\varepsilon_{fl1}}{[1 - \frac{2}{3} Cg(t)] \varepsilon_{flu}(t, t_0, f_{c28}, 10, 1, r_m, \rho_h, \rho_s, )} \tag{6-8}$$

$$\varepsilon_{fl1} = U_1 [1 - \frac{2}{3} g(t_1)] \varepsilon_{flu}(t, t_0, f_{c28}, 10, 1, r_m, \rho_h, \rho_s, ) \tag{6-9}$$

## II- Facteurs influençant le fluage de béton :

- 1) **Effet de la contrainte appliquée est de la résistance du béton :** Pour les contraintes appliquées ne dépassant pas  $1/3$ <sup>12</sup>, le fluage d'un béton donné sous une période de chargement donnée peut être proportionnel à la contrainte. Pour différents bétons ayant la même contenance pâte de ciment, le fluage est approximativement proportionnel au rapport contrainte/résistance.
- 2) **Effet de la durée de chargement :** Le tableau suivant illustre l'effet de la durée de chargement sur le fluage<sup>15</sup>

Durée de chargement	Pourcentage du fluage à long terme
28 jours	40%
6mois	60%
1ans	75%
5ans	90%
10ans	95%
30ans	100%

**Tableau6-1 : Evolution du fluage dans le temps**

- 3) **Effet de l'âge au premier chargement :** Il est essentiellement du à l'augmentation de la résistance du béton avec l'âge. Du fait que pour une contrainte donnée, le fluage est inversement proportionnel à la résistance, l'effet de l'âge au premier chargement peut être estimé pourvu que la relation résistance-âge soit connue.
- 4) **L'effet de l'humidité relative :** A titre d'exemple les fluages à 70% d'humidité relative sont donnés dans le tableau suivant<sup>12</sup> :

Composition	Ciment portland ordinaire	sable	Gravier concassé	Fluage
A	1	2	4	$120 \cdot 10^{-6}$
B	1	1.5	3	$100 \cdot 10^{-6}$
C	1	1	2	$70 \cdot 10^{-6}$

**Tableau6-2 : Le fluage en fonction de la composition**<sup>12</sup>

Quand le béton atteint un équilibre d'humidité avec l'atmosphère 'environnante, le fluage devient presque indépendant de l'humidité relative de l'air environnant. L'augmentation d'humidité réduit le fluage, car cette augmentation réduit le taux de migration d'humidité du béton vers l'extérieur et donc réduit l'écoulement de l'eau adsorbée.

- 5) **Effet de la température** : Le taux de fluage croît avec la température jusqu'à atteindre le maximum à 70°C et au-delà de cette température il décroît jusqu'à une température de 100°C, à peu près <sup>11</sup>.
- 6) **Effet de la contenance pâte de ciment** : La contenance est de l'ordre de 28-40% par volume du béton. Le fluage peut être supposé croître au taux approximatif de 5% pour chaque 1% d'augmentation en contenance pâte de ciment. L'augmentation du fluage avec la contenance pâte de ciment est due à la déformation qui a lieu dans la pâte de ciment du fait que les agrégats ne se déforment pas sous chargement. Le fluage dépend aussi de la porosité de la pâte de ciment; La porosité ayant influence directe sur la résistance du béton.
- 7) **Effet de E/C** : Durant l'hydratation, le ciment réagit avec approximativement 23% de l'eau <sup>15</sup> pour former le gel de ciment qui a une porosité presque constante de 28% approximativement. L'eau de mixage en surplus de celle nécessaire à la réaction chimique rompt des pores capillaires cette eau est évaporable. Donc l'augmentation du rapport E/C entraîne une augmentation de l'espace des pores capillaires résultant ainsi en réduction de la résistance et une augmentation du fluage, et aussi une augmentation de la contenance pâte de ciment.
- 8) **Effet de la quantité d'agrégats, d'eau et de ciment** : Ces effets séparés sont pris en considération une fois la contenance pâte de ciment et le rapport E/C sont définis.
- 9) **Effet de type et finesse du ciment** : Le type de ciment et sa finesse affectent le fluage essentiellement à travers leurs effets sur le taux d'hydratation.
- 10) **Effet de la dimension, de la granulométrie et de la forme des agrégats** : Pour un type d'agrégats donné, les effets de sa dimension, sa forme et sa granulométrie sur le fluage sont dus à leurs effets sur la quantité d'eau de mouillage nécessaire à la maniabilité.

#### II-1- Estimation du fluage- CEB-FIP recommandations <sup>15</sup> :

$$\varepsilon_{flu} = \frac{f_c}{E_i} \phi_t \quad (6-10)$$

$E_i$  : le module d'élasticité du béton à 28 jours

$\phi_t$  : coefficient de fluage produit de 5 coefficients partiels.

$$\phi_t = k_c k_d k_b k_e k_t$$

$k_c$  : dépend de l'environnement.

$k_d$  : dépend de la densité du béton

$k_b$  : dépend de la composition du béton.

$k_e$  : dépend de l'épaisseur de l'élément

$k_t$  : dépend du développement de la déformation différée avec le temps.

### **III- Le fluage des BHP :**

On choisit de décomposer le fluage en partie obtenue sans échange hydrique, qu'on appelle fluage propre, et une autre partie due au séchage, qu'on appelle fluage de dessiccation.

#### **III-1- Fluage propre des BHP(FP) :**

Le fluage des BHP est plus faible en amplitude que celui des bétons ordinaires. La réduction peut atteindre un rapport de 2 à 3. Avec leur faible rapport en E/C, la contenance pâte de ciment élément susceptible aux déformations par fluage est réduite ce qui explique le fluage réduit des BHP. Ceci peut aussi être expliqué par le fait que la quantité d'eau étant réduite, elle a tendance à se limiter à celle strictement nécessaire à l'hydratation du ciment et donc les BHP contiennent moins d'«eau libre» susceptible d'occuper les pores et donc affaiblir la résistance en laissant des vides après évaporation. Certains auteurs trouvent des valeurs de fluage propre des BHP voisines de celles des BO<sup>12</sup>, tandis que d'autres constatent au contraire des valeurs très inférieures à celles des BO<sup>11,12</sup>. On constate que les BHP sans fumée de silice ont un coefficient de fluage peu différent, bien qu'inférieur, à celui des BO. Par contre, ce coefficient est très réduit pour les BHP avec fumée de silice. Rappelons que le coefficient de fluage est donné comme suit :

$$k_{fl} = \frac{\varepsilon_{fl\infty}}{\frac{\sigma}{E_{i28}}} \quad (6-11)$$

$k_{fl\infty}$  ou  $\phi_{t\infty}$  peut être indifféremment le fluage propre, de dessiccation, où le fluage total est déduit de la formule (6-10) :

$\sigma$  : contrainte constante.

$E_{i28}$  : module élastique

$\sigma/E_{i28}$  : déformation élastique conventionnelle à 28 jours sous la contrainte  $\sigma$ .

A titre d'exemple, on donne le tableau (6-3) qui décrit le coefficient de fluage pour des différents BHP<sup>6</sup>:

Référence béton	BT	L1	G1	BTHP
E/C	0.44	0.38	0.38	0.27
S/C	0	0	0.08	0.10
V <sub>p</sub>	311	315	338	271
< F <sub>c28</sub> >(MPa)	55	78	94.5	101
E <sub>i28</sub> (GPa)	36.8	43	45.5	53.4
K <sub>fl</sub>	0.86	1.05	0.73	0.55
Expérience	0.92	0.92	0.92	0.92
BPEL	1.10	0.92	0.84	0.81
Fluage propre CEB				
K <sub>fl</sub>	1.7	2.33	0.73	0.73
Expérience	3.30	2.30	3.30	3.30
BPEL	3.44	2.89	2.63	2.54
Fluage propre RH=50%				
CEB				
K <sub>fl</sub> Expérience	0.84	1.28	0	0
Fluage de dessiccation RH=50%				

**Tableau6-3 : valeurs des coefficients de fluage K<sub>fl</sub> pour différents BHP chargés à 28 jours <sup>12</sup>.**

L'étude de la variation du coefficient de fluage K<sub>fl</sub>, en fonction de l'âge du chargement montre que ce coefficient diminue de 20% entre un essai commencé à 3 jours et un autre à 28 jours. Certains travaux <sup>12</sup> montrent que ce coefficient peut avoir de grandes variations en fonction de l'âge au chargement.

### III-2- Fluage de dessiccation des BHP :

Il est difficile de conclure sur le fluage de dessiccation, lorsqu'on prend en compte les résultats de la littérature. Cela provient de la grande disparité des compositions (des additions, des dosages en fluidifiants, etc.).

On observe que les BHP optimisés avec fumée de silice ne développent aucun fluage de dessiccation. Les BHP sans fumée de silice présentent quant à eux un fluage de dessiccation non négligeable, bien que moins élevé que celui des bétons ordinaires.

### III-3- *Modèle de fluage prenant en compte la composition du matériau :*

- *Modèle empirique :*

Quand on aborde la question des modèles empiriques au modèle de différents codes de calcul, on considère que chaque pays possède son règlement. Le comité européen du béton (CEB) tend à uniformiser toutes les approches, et il propose un modèle pour le calcul de déformation du béton<sup>11,12</sup>. Mais la précision de ces modèles pour le fluage reste faible. BAZANT<sup>12</sup> propose un modèle pour le calcul des déformations différées du béton en fonction de la composition du matériau, mais la non prise en compte de l'autodessiccation rend l'application du modèle inadéquat pour les BHP.

- *Méthodes d'homogénéisation :*

Les méthodes d'homogénéisation permettent à priori de prévoir les déformations en fonction de certains paramètres de formulation qui sont essentiellement la concentration granulaire et le module du granulat. Seuls les déformations à contrainte uniforme, sans séchage, sont accessibles à ces méthodes. Les différents travaux réalisés dans ce domaine montrent que le fluage diminue lorsque la concentration granulaire augmente. De plus la nature des granulats modifie l'amplitude du fluage, puisque à nature de matrice égale et pour la concentration granulaire de 0.55 le fluage double pratiquement entre le granulat de fer et celui de verre. Il s'agit d'un effet du module d'élasticité du granulat et des conditions d'adhérence à la surface.

Plus récemment des travaux<sup>12,35</sup> ont proposé un modèle complet de calcul du fluage propre en fonction de la concentration granulaire, avec prise en compte du vieillissement du matériau. Le modèle géométrique est une combinaison linéaire des modèles présentés par les bornes de HILL<sup>12</sup> (modèle parallèle série). Ce modèle est réalisé dans le cadre d'une méthode approchée, appelée «solidification theory». L'approche considère que les hydrates eux même ont un comportement viscoélastique ; seulement le développement de l'hydratation, qui conduit à une augmentation du volume des hydrates, à l'échelle microscopique, a une fonction de fluage fixée une fois pour toute, mais qui a été ajustée sur des résultats expérimentaux.

On s'aperçoit que l'étude du fluage, en fonction de la composition, a été depuis longtemps sujet de recherche. Les modèles existants partent tous de la connaissance de la matrice, ce qui

les rend non entièrement prédictifs du fait que la connaissance de la matrice n'est pas entièrement cernée.

**Chapitre VII :****CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET  
FORMULATION DES BETONS****I- Introduction :**

Ce n'est pas avec n'importe quel granulats, n'importe quel ciment et n'importe quel adjuvant réducteur d'eau qu'on peut fabriquer un BHP économiquement crédible. Cependant, et à travers la littérature existante, un cheminement est tracé dans ce qui suit afin d'aider à l'élaboration de ce matériau. Ce cheminement consiste à :

1. Un choix plus rigoureux des constituants : ( l'aspect qualitatif)
2. Le dosage de ces constituants : (l'aspect quantitatif)

L'objectif de ce travail étant de faire une étude comparative entre les BO et les BHP pour un certain nombre de propriétés constructives, dans ce chapitre nous allons concevoir ce béton avec des matériaux localement disponible.

**II- Matériaux :**

Une investigation a été faite pour sélectionner les matériaux existant aux carrières et aux cimenteries situées aux environ d'Alger, afin d'avoir une formulation avec des matériaux locaux. Un inventaire exhaustif des multiples questions concernant le choix des constituants des bétons de qualités demande 5 à 10 ans d'expériences, bien qu'une étude des matériaux disponible sur le territoire national soit indispensable afin de pouvoir considérer la possibilité de fabriquer un béton de qualité dans un site donné.

**II-1- Granulats :**

Trois carrières ont mis leurs produits à notre disposition ; il s'agit des carrières de JOBERT, CAP DJENET et KADDARA. Nous avons choisi les granulats ayant les critères

nécessaires pour qu'ils puissent remplir leurs tâches dans un béton de qualité. Ces critères sont :

- a) *Forme des granulats* : Pour élaborer un mélange granulaire compact, il sera préférable de choisir une forme de grains se rapprochant le plus possible de la sphère surtout pour la classe dominante. Cependant la rugosité des granulats concassés favorise l'imbrication de la pâte dans les granulats, d'où une meilleure résistance. Ce critère est vérifié en observant les granulats sur place.
- b) *Caractéristique mécanique* : Il est nécessaire de prendre des granulats dont la résistance est comprise entre 60 et 120 MPa, le module d'élasticité d'environ 20000 MPa et un coefficient de poisson variant entre 0.2 et 0.31,  $\nu \in [0.2, 0.31]$ . Il est évident que pour produire un béton résistant, il faut utiliser des granulats résistants eux même. Pour cela nous avons consulté les études faites par des sociétés qui ont utilisé ces matériaux.
- c) *Nature minéralogique* : Le choix de la nature minéralogique de se faire de manière à éviter toute réaction néfaste qui peut se produire à l'interface pâte-granulats (réaction alcali-granulats). Nous avons eu la nature minéralogique des granulats à partir des carrières, et en se basant sur nos observations.
- d) *Propreté* : Les granulats doivent être propres, dépourvus de toute poussière pouvant constituer un film entre la pâte de ciment et les granulats conduisant à une mauvaise adhérence pâte-granulats.

Pour satisfaire ces conditions nous avons choisi les granulats utilisés par la société Algériens des ponts S.A.P.T.A (gravier et gravillons concassé, sable de forme sphérique)

Dans le but de minimiser les dispersions apportées par les caractéristiques des matériaux, l'étude expérimentale sur béton a été menée avec le même lot de matériaux.

#### **II-1-1- Gravier et gravillon :**

Nous avons utilisé des granulats provenant d'un gisement de calcaire dur, ce gisement se situe à KEDDARA et est la source de plusieurs entreprises qui fabriquent des bétons de qualité.

Ces granulats sont denses, propre, de forme non allongée proche de la forme cubique et d'une granulométrie satisfaisante (d'une résistance d'environ 80 Mpa). Nous pouvons donc les utiliser sans crainte aucune pour la confection des bétons de qualité.

**II-1-2- Sable :**

Les caractéristiques principales requises pour un sable à béton sont la propreté, définie par l'essai d'équivalent de sable, et la granularité, déterminée par le module de finesse qui est lui-même déterminé par l'analyse granulométrique.

Pour ces deux caractéristiques les valeurs optimales sont respectivement :

- Equivalent de sable > 70
- $1.80 < \text{Module de finesse} < 3.2$ , bien que pour les BHP il soit souhaitable d'avoir un module de finesse supérieur à 2.2.

Il ressort, d'après les résultats obtenus, que le sable propre et de finesse telle que la courbe granulométrique qui le caractérise se situe presque totalement à l'intérieur du fuseau de référence des bons sables à béton.

Ce sable d'oued provient de Baghlia, et il est riche en silice.

**II-1-3- Caractéristiques physiques des granulats(NF P18-560)**

Echantillon	Sable	Gravier 5/15	Gravillon 3/8
Ouverture des tamis(mm)	Tamisât (%)		
16	-	100	-
12.5	-	92.4	-
10	-	66.4	100
8	100	33.1	99.5
6.3	98.5	11.8	86.6
5	96.5	6.3	58.975
2.5	78.5		4.635
1.25	57.5		
0.63	38.4		
0.315	13.6		
0.16	2.8		
0.08	0.8		

**Tableaux7-1 : Analyse granulométrique des granulats**

Masse volumique apparente	1.54	1.41	1.43
Masse volumique absolue	2.70	2.69	2.69
Propreté supérieure	-	0.30	0.13
Equivalent de sable	74	-	-
Module de finesse	3.12	-	-

**Tableaux7-2 : caractéristiques initiales des granulats**

Vu l'équivalent de sable insuffisant pour la confection de béton de qualité, nous avons procédé au lavage du sable et à son tamisage. Les résultats obtenus après le tamisage sont les suivants :

Ouverture des tamis(mm)	Tamisât (%)
8	-
6.3	-
5	100
2.5	73.88
1.25	50.5
0.63	25
0.315	5
0.16	0.66
0.08	0.55
Equivalent de sable	90.32%
Module de finesse	3.45

**Tableau7-3 : les caractéristiques du sable après lavage et tamisage**

*II-1-4 courbe granulométrique :*

**Fig.7-1 : Courbe granulométrique et courbe de référence de FAURY**

Les résultats d'essais effectués à la S.A.P.T.A montrent que :

- L'essai Los Angeles donne un coefficient  $LA=1000 \frac{m}{M}$  compris entre 15 et 25. Ce qui signifie que ces granulats sont entre la bonne et la moyenne qualité et peuvent être utilisés pour la fabrication des bétons de qualités.
- L'essai de convenance montre la facilité d'imbrication de la pâte et de granulats quoi que ces derniers se rapprochant de la forme cubique souhaiter.
- Nous avons tenu aussi à utiliser les même granulats de la S.A.P.T.A car les bétons de cette dernière ont atteint plus de 41 MPa sans les adjuvants et avec un ciment CPA 325 avec un dosage économique de  $400 \text{ kg/m}^3$

*Remarque :* tous les essais concernant l'identification des matériaux ont été réalisés à la S.A.P.T.A sauf le tamisage et l'équivalent de sable qui ont été réalisés au laboratoire de structure à l'USTHB.

## II-2 Ciment :

Nous avons travaillé avec un ciment CPJ 45 fabriqué par la cimenterie de Maftah

Pour identifier le ciment utilisé, nous avons procédé à son analyse chimique au laboratoire de MEFTAHA. Nous avons aussi calculé sa composition minéralogique, et procéder à des essais physico-mécaniques.

Les caractéristiques du ciment sont données dans le tableau (7-4) :

Analyse chimique	
SiO <sub>2</sub>	20.75%
CaO	63.38%
MgO	3.11%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.11%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.29%
SO <sub>3</sub>	2.40%
P.F	2.64%
CaOl	0.29%
R.I	0.95%

Composition potentielle	
C <sub>3</sub> S	58.98%
C <sub>2</sub> S	12.45%
C <sub>3</sub> A	8.70%
C <sub>4</sub> AF	9.46%
Essais physico-mécaniques	
Densité(g/l)	1032
Surface spécifique blaine(cm <sup>2</sup> /g)	3107
Temps de prise début(h)	1.56
Fin(h)	3.43
Expansion(mm)	0.87
Résistance à la flexion (MPa)	
2 jours	4.33
7 jours	6.73
28 jours	7.78
Résistance à la compression (MPa)	
2 jours	19.10
7 jours	38.02
28 jours	49.72
Consistance/normale (%)	27.16

**Tableau7-4 : caractéristiques du ciment**

Il s'agit donc d'un ciment :

- De classe vraie de 49.72 MPa, donc relativement bonne.
- Représente une réactivité rhéologique (C<sub>3</sub>A≈8%), c'est à dire qu'il ne fixe pas une grande quantité d'eau de gâchage importante dans les instants qui suivent le malaxage, ayant une surface spécifique un peu au-dessous de celle souhaitée 3500 à 4000.

Afin d'éviter tout changement sur la qualité du ciment, on a fait un bon entreposage du ciment en couvrant les sacs d'une toile de plastique. Cela s'est avéré très efficace car tout au long du projet aucune préhydratation n'est constatée.

nous avons choisi de travailler avec ce ciment en se basant sur des critères suivants :

- Le faible pourcentage de  $C_3A$ .
- Une bonne résistance à la compression.
- Pas de réactions néfastes avec les adjuvants.
- La bonne réputation des bétons confectionnés à partir de ce ciment(d'après les rapports le laboratoire de contrôle).

### ***II-3- Les fluidifiants :***

La société GRANITEX de OUED ES SMAR possède deux grands types d'adjuvants utiles à notre travail :

- MEDAFLUIDS SF et SFA : à base de naphthalène sulfonates.
- MEDAPLAST SP : à base de résine mélanines.

les caractéristiques des superplastifiants sont données dans le tableau (7-5)

Caractéristiques	Médafluid SFA	Médaplast SP
Forme	Liquide	Liquide
Couleur	Marron clair	Marron
PH	7-8	7-8
Densité	1.20±0.01	1.18±0.01
Teneur en clore	<1g/l	<1g/l
Propriétés	<p><i>Béton frais :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminue l'eau de gâchage et par conséquent E/C.</li> <li>• Augmente la fluidité.</li> <li>➤ Augmente la durée de la maniabilité.</li> </ul> <p><i>Béton durci :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration des résistances mécaniques.</li> <li>• Augmentation de la durabilité du béton.</li> <li>• Diminution de l'adsorption capillaire.</li> </ul>	<p><i>Béton frais :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration de l'ouvrabilité à E/C constant.</li> <li>• Conservation de l'ouvrabilité par temps chaud</li> <li>• Réduction du dosage en ciment et le rapport E/c</li> </ul> <p><i>Béton durci :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration des résistances mécaniques.</li> <li>• Diminution de la porosité.</li> <li>• Amélioration de l'adhérence granulats-ciment</li> <li>• Diminution de l'absorption capillaire.</li> </ul>

**Tableau7-5 : caractéristique des fluidifiants**

#### ***II-4- Eau de gâchage :***

On conçoit en premier lieu, que les impuretés nocives interdites pour les granulats ne doivent pas être apportées par l'eau de gâchage.

#### ***II-4-1- Caractéristiques physiques :***

L'eau de gâchage doit être propre : elle ne doit pas contenir de matières en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes <sup>16</sup> :

2g/litre pour les bétons à hautes résistances.

5g/litre pour les bétons à faibles résistances

#### **II-4-2- Caractéristiques chimiques :**

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de <sup>16</sup> :

15g/litre pour les bétons à hautes performances.

30g/litre pour bétons à faibles résistances.

**II-4-3- Origine :** nous avons utilisé l'eau potable de robinet. Vu l'absence des analyses chimique et physique de cette eau (on n'a pas pu l'analyser), il est difficile de prédire si cette eau est soumise ou pas aux exigences de la norme (AFNOR).

### **III- Matériels utilisés :**

1. *Malaxeur*: les bétons ont été confectionnés dans un malaxeur à axe vertical, par gâchée de 0.05 m<sup>3</sup>.
2. *Moules*: on a utilisé des éprouvettes cylindriques(16×32).
3. *Aiguille vibrante* : de puissance de 550W.
4. *Presse hydraulique* : les écrasements ont été faits par une presse hydraulique «TONIPAC 1000 TONI NOUSTRIE» de capacité de 1500 KN.
5. *Cône d'ABRAMS* :
6. *Compareurs* : «1div". =0.002mm ».
7. *Balances* : une de grande capacité et l'autre très précise(precision ± 1mg) pour la mesure des masses de superfluidifiant.

### **IV- Dosage des matériaux :**

Après avoir sélectionner les matériaux aptes à rentrer dans la composition de nos bétons, nous devons les doser, en vue d'obtenir une certaine maniabilité et une certaine résistance mécanique. Donc notre travail de formulation consiste à chercher un compromis entre ces deux propriétés importantes la résistance et la maniabilité qui satisfont nos exigences.

Les paramètres de formulation retenus sont :

- *Le volume de la pâte* : les résultats de la littérature <sup>6,11,12</sup> montrent clairement que l'effet du volume de la pâte sur les déformations instantanées et différées est important.
- *Le rapport E/C* : nous savons que la résistance du béton est influencée par ce paramètre classique, et dont la réduction permet d'obtenir des résistances élevées, en

absence de fumée de silice (le cas de notre travail ), c'est le paramètre principal qui caractérise la qualité de la matrice <sup>10</sup>.

#### IV-1- Formulation du béton :

- *Granulats* : nous avons appliqué la méthode de FAURY (courbe granulaire de voir chapitre1) afin de déterminer approximativement les dosages des granulats. Les résultats obtenus par cette méthode sont donnés dans le tableau (7-6) :

Granulats	Pourcentage en volume(%)	Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Masse des granulats (Kg)	L-A
Sable	37	2700	622	//
Gravillon	10	2690	169.56	19
Gravier	53	2690	898.42	21

**Tableau7-6 : le dosage en granulats**

Nous avons utilisé la méthode de FAURY car:

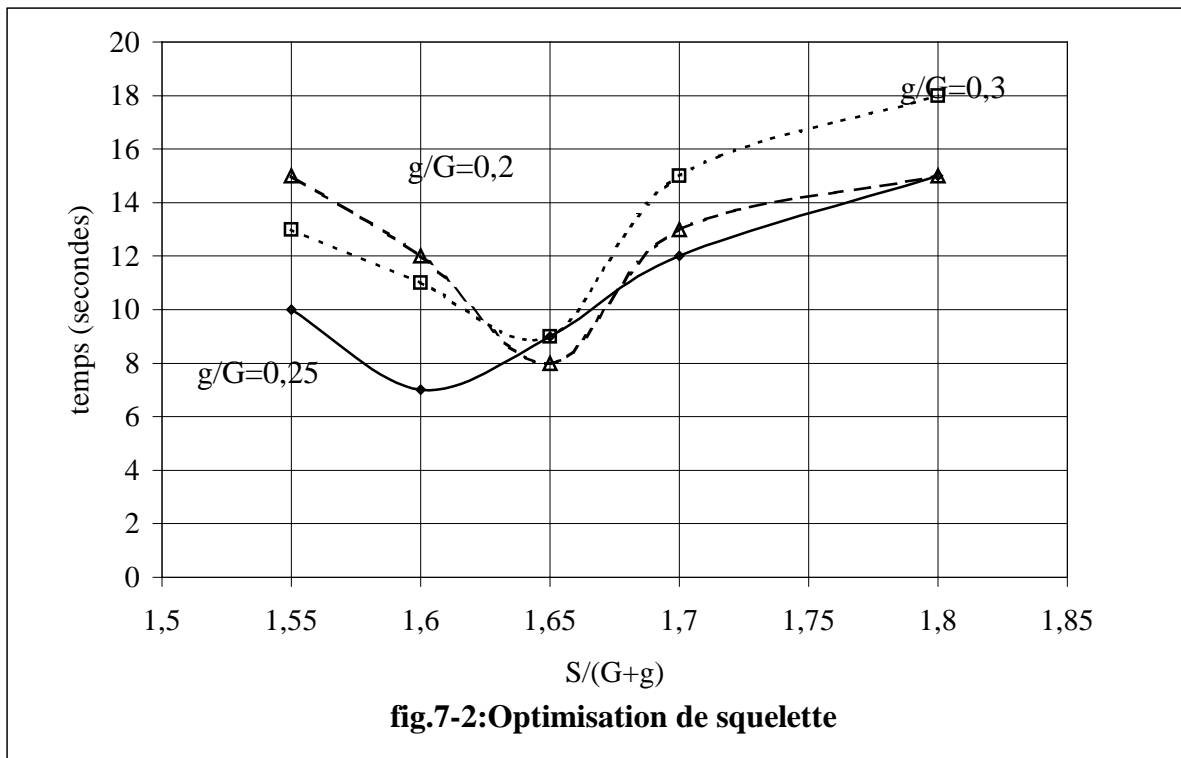
1. Elle est applicable à tous les granulats, quelle que soit la masse volumique.
2. Elle tient compte de l'effet des vides (vides qui varient avec la racine cinquième de la dimension des grains)
3. Elle introduit «l'effet des parois » qui est fonction de celle du rayon moyen du moule pour tenir compte de l'effet de coffrage et armatures.

La composition finale du béton est faite de la manière suivante :

- *Le dosage en ciment* : nous avons choisi un dosage en ciment égale à 450 Kg/m<sup>3</sup>. Ce dosage est proche de l'optimum économique (qui est de 425 Kg/m<sup>3</sup> ) et qui répond aux exigences théoriques de la résistance souhaitée.
- *Le dosage en eau* : Le rapport E/C étant égale à 0.5, il est facile de déduire la quantité d'eau nécessaire en tenant compte des teneurs en eau des granulats.
- *Optimisation de squelette* : fixant les quantités E et C, il faut donc trouver les rapports

$\frac{S}{G+g}$  et  $\frac{g}{G}$  pour lesquels le temps d'écoulement au maniaillimètre L.C.L est le plus

faible, en se basant sur les résultats de la littérature pour faire le minimum d'essais. Les résultats obtenus sont décrits dans le graphe (7-2) (le temps est estimé par secondes) :



la composition déduite de ce graphe est illustrée dans le tableau(7-7) :

G(kg)	g(kg)	S(kg)	E(l)	C(kg)	g/G	S/(G+g)
860	215	670	225	450	0.25	0.623

**Tableau7-7 : composition de béton après optimisation.**

Cette composition est donnée pour le temps d'écoulement au maniabilimètre LCL(t=7secondes).

Pour faire notre étude comparative entre un BHP et un BO, nous avons délibérément conservé le même squelette. Pour réduire E/C des BHP nous avons introduits des mélanges d'adjuvants afin de réduire la quantité d'eau dans le BHP

*IV-1-1 Choix des fluidifiants(EN 934-2) :*

De façon pratique, 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(longueur des chaînes moléculaires, impureté, teneur en sulfonates résiduelles, etc.) que de la quantité d'extraits secs(40 à 42% pour les fluidifiants à base de naphthalène, 22% pour ceux à base de mélamine).

Pour cela nous avons réalisé trois bétons dont nous avons mesuré la maniabilité (le slump) ainsi que l'évolution de cette dernière dans le temps ; les trois bétons ayant le même squelette granulaire et même rapport E/C. Dans le premier nous avons utilisé un fluidifiant à base de naphthalènes SFA, dans le deuxième un fluidifiant à base de résine mélanine SP et un mélange des deux pour le troisième. Le tableau (7-8) englobe tous les résultats de nos essais

Béton	Gravier8/ 15(Kg)	Gravillon 3/8(Kg)	Sable (kg)	C (kg)	E/C	SFA (%C)	SP (%C)	F <sub>c7j</sub> MPa	Affaissement (cm)
1	860	215	670	450	0.35	2	-	39.8	17.5±0.5
2	860	215	670	450	0.35	-	2	38.3	16±0.5
3	860	215	670	450	0.35	1.5	0.5	40.1	17±0.5

**Tableau7-8 : résistances et slumps des bétons selon l'adjuvant utilisé**

Nous avons constaté que le béton réalisé avec le superplastifiant SFA conserve une maniabilité plus grande par rapport aux deux autres bétons. D'autre part le troisième béton semble être plus résistant que les deux autres.

VI-1-2- *Choix de E/C* : pour obtenir le E/C qui nous donne la meilleure résistance, accompagne d'une bonne maniabilité et qui la conserve la plus longtemps possible sa maniabilité, nous avons procédé de la manière suivante :

1. Confectionner des bétons de même squelette granulaire, même dosage en ciment et même adjuvant avec différents E/C.
2. Mesurer la maniabilité de chaque béton en fonction de l'âge.
3. On considère que le béton qui a un slump inférieur à 5 cm est très ferme par conséquent peu maniable. Le dosage en fluidifiant SFA est de 2%

Les résultats de nos essais sont données dans le tableau (7-9) :

Béton	E/C	Juste après malaxage(cm)	Après 15minutes	Après 30minutes	Après 60minutes
1	0.40	19.6	11.9	8	5.3
2	0.35	17.5	9.2	6.5	4.6
3	0.3	14.3	7.1	<5	-
4	0.25	8	<5	-	-

**Tableau7-9: évolution de la maniabilité en fonction de E/C**

• **Estimation de dosage en fluidifiant dans le BHP :**

L'expérience montre que l'on obtient, en général, un béton à haute performance ayant un affaissement de l'ordre de 200 mm lorsque la teneur en extraits secs (exprimée par rapport à la masse en 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 <sup>20</sup>.

Nous commençons donc à calculer la quantité de fluidifiant en prenant un dosage en extrait sec de 1% et d'utiliser la formule suivante <sup>20</sup> :

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

X : dosage de fluidifiant dans un mètre cube de béton (l/m<sup>3</sup>).

C: dosage de ciment par m<sup>3</sup> (Kg).

s : teneur en extrait sec.

d<sub>1</sub> : densité du fluidifiant.

$$S = \frac{100.F}{C}$$

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

On désire fabriquer un béton E/C=0.35 en utilisant 157.5 l d'eau de gâchage par mètre cube.

Le fluidifiant utilisé à une teneur en extrait sec de 40% et une densité de 1.20. le dosage en ciment est 450 Kg/ m<sup>3</sup>.

Une teneur en extrait sec de 1% correspond à 4.5 kg d'extraits secs, ce qui correspond à un volume de fluidifiant de :

$$X = 100 \cdot \frac{1}{100} \cdot 450 \cdot \frac{1}{40} \cdot \frac{1}{1.20}$$

X=9.375 litres.

Dans le calcul de la quantité d'eau de gâchage, il faudra tenir compte du fait que le fluidifiant apporte une quantité de liquide comme suit (selon Y. MALIER<sup>20</sup>).

$$V_e = \frac{100 - s}{100} \cdot x \cdot d_l = \frac{100 - 40}{100} \cdot 9.375 \cdot 1.20 = 6.75 \text{ litres.}$$

Cette quantité d'eau de gâchage est prise en considération dans la quantité d'eau de gâchage.

Donc :  $E = E_i - V_E = 150.75$  litres.

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

$V_E$  : le volume d'eau apporté par le fluidifiant.

Ces résultats nous ont permis de confectionner un BHP pour lequel nous avons mesuré son affaissement en fonction de l'âge.

Le tableau (7-10) donne la composition du BHP :

G	g	S	E	C	SFA	E/C	Slump	Slump	Slump
8/15	3/8	0/5					15mn	30mn	60mn
Kg	Kg	Kg	Kg	Kg			cm	cm	cm
860	215	670	150.75	450	9.375Kg	0.35	9.8	7.1	4.9
					11.25 l				

**Tableau7-10 : composition finale du BHP.**

Le béton ainsi obtenu est assez maniable après une heure de malaxage, sa maniabilité juste après malaxage est de 18.2cm. Donc nous avons gardé cette formulation, sans faire aucune correction, pour la confection des bétons à hautes performances qui seront l'objet de notre étude par la suite.

**IV-2- Récapitulatif :**

Pour calculer la formulation du béton à haute performance on a procédé de la manière suivante :

- Nous avons choisi des granulats aptes pour la confection des BHP.
- Nous avons choisi un ciment peu réactif, c'est à dire, un ciment qui consomme peu d'eau durant la première heure qui suit le début du malaxage (contenant moins de C<sub>3</sub>A).
- Nous avons fixé E/C qui devrait garantir un certain niveau de résistance en compression et, d'autre part, un certain dosage en eau qui devrait garantir un certain niveau de maniabilité une heure après le malaxage du béton.
- Calculer le dosage en fluidifiants nécessaire pour une certaine maniabilité.

Toute investigation faite dans cette partie a pour but d'éviter :

- Une perte très rapide d'affaissement et l'aspect luisant que prend très vite le béton dus au sous dosage en eau du béton d'essai.
- Une réactivité du ciment qui ne peut être contrôlée que par l'addition d'un retardateur, et qui nous oblige à augmenter le E/C du béton à hautes performances tout en sachant que cette augmentation du E/C se traduira par une perte de résistance.
- La formulation finale est donnée dans le tableau(7-11).

Ingrédient	G	g	S	C	E	E/C	Fluidifiant	Slump 0heure	Slump 1Heure
BO	860	215	670	450	225	0.5	Néant	14.5	4.9
BHP	860	215	670	450	150.75	0.35	11.25	18.2	<2 cm

**Tableau7-11 : composition des bétons**

**Chapitre VIII :**

**PROGRAMME D'ESSAIS SUR BETON DURCI**

---

**I- Introduction :**

Après avoir confectionner les BO et les BHP à partir des matériaux locaux, nous avons procédé à la comparaison de leurs propriétés. Nous avons considéré les propriétés mécaniques, ensuite les déformations (instantanées et différées) des deux matériaux.

- Pour les propriétés mécaniques et les déformations instantanées, les essais sont effectués sur des éprouvettes cylindriques.
- Pour les déformations différées, les essais sont effectués sur des poutres et des éprouvettes parallélépipédiques.

**II- Propriétés mécaniques :**

Les paramètres considérés sont :

- La résistance à la compression.
- Le module d'élasticité.
- La résistance à la traction.
- Le coefficient de poisson.

**II-1- Programme d'essai :**

les essais ont porté sur :

- Neuf éprouvettes (16×32) pour chacun des bétons, pour mesurer la résistance en compression et le module d'élasticité à 7, 14 et 28 jours.
- Neuf éprouvettes (16×32) pour chacun des bétons, pour mesurer la résistance en traction par fendage à 7, 14 et 28 jours.

**II-2- Confection du béton :**

La confection du béton à été faite au laboratoire de structure à l'IGC.

Les bétons ont été confectionnés dans un malaxeur à axe vertical et à une vitesse unique «relativement rapide».

**II-3- Cycle de malaxage :****a) Béton ordinaire :**

- Mélange à sec des ingrédients pendant 60 secondes.
- Introduction de l'eau de gâchage.
- Malaxage pendant 120 secondes.

**b) Béton à hautes performances :**

- Mélange à sec des ingrédients pendant 60 secondes.
- Introduction de l'eau de gâchage et le tiers de superplastifiants
- Malaxage pendant 90 secondes.
- Ajout des deux tiers restants de superplastifiants.
- Malaxage pendant 30 secondes.

La période totale de malaxage est de trois minutes.

Les moules ont été vibrés à fur et à mesure de leur remplissage en utilisant une aiguille vibrante de 30 mm de diamètre.

**II-4 Démoulage :**

Pour faciliter le démoulage des éprouvettes, les parois sont huilées avec de l'huile de vidange. Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après le coulage du béton frais.

**II-5- Cure du béton :**

Elle consiste à conserver l'éprouvette sous une couverture humide, cette dernière a été couverte par toile en plastique pendant une semaine. Par la suite les éprouvettes de béton sont laissées à l'air libre.

Nous signalons que les essais faits par HAMRAT<sup>5</sup> montrent que les éprouvettes ainsi traitées donnent des résistances plus élevées que celles immergées dans l'eau ; d'autre part, on a préféré cette méthode afin que les conditions de la cure soient semblables à celles des poutres.

**II-6- Surfaçage des éprouvettes :**

Il consiste à rendre les plans d'application de la force de compression perpendiculaire à l'axe longitudinal des cylindres et éviter toute excentricité qui peut induire un moment de flexion parasite et risque de causer un écrasement local du béton. Dans ce but on a scié (2 à 3mm) les éprouvettes, puis on les a surfacées par le soufre fondu.

**II-7- Résistance à la compression ( $f_{cj}$ ) :**

Les essais ont été réalisés au Laboratoire National d'Habitat et de la Construction LNHC. Les essais de la compression ont été faits sur des éprouvettes(16\*32). Les écrasements ont été réalisés par une presse hydraulique de portée de 1500KN à une vitesse réglable.

**II-8- Résistance à la traction par fendage( $f_{tj}$ ) :**

Elle a été déterminée sur des éprouvettes cylindriques (16\*32), en utilisant la même presse que celle utilisée pour la compression simple.

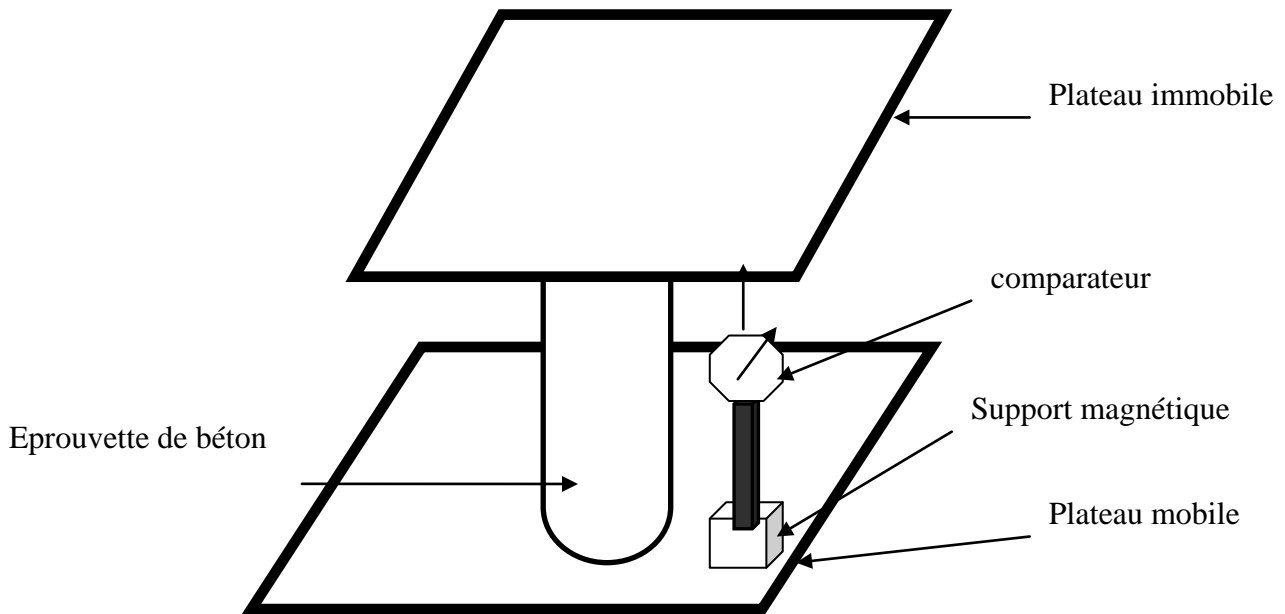
**II-9- mesure du module d'élasticité :**

L'appareillage permettant de mesurer les déformations de l'éprouvette n'est pas normalisé. Il existe plusieurs types ; parmi ces types nous avons choisi celui décrit par R. DUPAIN, <sup>34</sup> car il est facile à réaliser par les moyens dont nous disposons.

Le dispositif permettant de mesure le module d'élasticité est schématisé par la figure(8-1), de moment que le module d'élasticité est déduit des déformation axiales.

**II-10- Courbe contrainte déformation :**

Vu le temps qui nous a été accordé et par risque de détériorer les comparateurs nous n'avons pas pu utiliser le dispositif indiqué sur la figure (8-1). Par contre nous avons utilisé un comparateur de précision de  $2 \times 10^{-3}$ mm, ce comparateur est porté sur un pied mené d'un aimant qui nous a permis de fixer le comparateur sur le plateau inférieur de la presse. L'autre extrémité du comparateur doit toucher le plateau supérieur de la presse juste au moment où la compression commence afin de mesurer les grandes déformations des bétons.



**Fig.8-1 : Mode opératoire permettant la mesure des déformations axiales**

Après la mise en place de l'ensemble de l'éprouvette, on mesure les forces correspondantes à des déplacements donnés. Ensuite on trace la courbe contrainte-déformation du BHP et du BO. Par conséquent nous déterminons leurs modules d'élasticité sécants, qui ne sont autres que les pentes des droites tangentes à l'origine.

**III- Retrait et fluage :****III-1- objectif :**

L'objectif de ces essais est l'étude du comportement des poutres en béton ordinaire et en béton à hautes performances simplement appuyées (isostatique) vis-à-vis du retrait et du fluage.

Nous avons réalisé deux expériences de fluage et de retrait en flexion, afin d'étudier le comportement du béton sous un autre mode de chargement que la compression simple.

Nous étudions alors l'influence de la classe du béton sur les déformations différées de la poutre en flexion sous charge de longue durée.

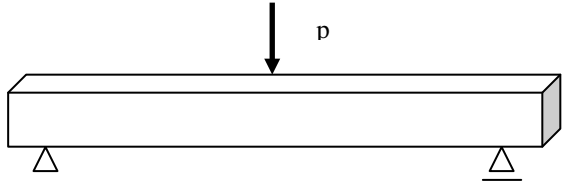
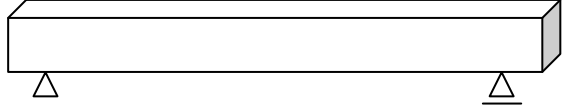
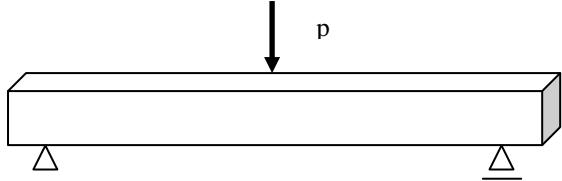
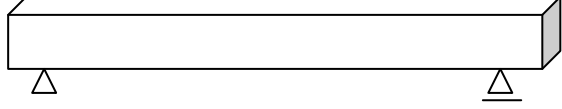
**III-2- Programme d'essais :**

Nos essais portent sur quatre éprouvettes parallélépipédiques identiques (poutres). Deux d'entre elles ont été coulées avec le béton ordinaire, tandis que les deux autres ont été coulées par le béton à hautes performances.

Une poutre de chaque béton est destinée à supporter une charge constante, concentrée à mi-travée pendant six mois (essai de fluage en flexion).

Les deux autres poutres ne sont pas chargées, réalisées pour la mesure du retrait.

Les quatre poutres sont simplement appuyées (isostatique).

Classe de béton	Mesure	Schéma
BO	Fluage	
	Retrait	
BHP	Fluage	
	Retrait	

**Tableau8-1 : Essais du fluage et du retrait sur poutres**

**III-3- Dimensions :**

Les pièces d’essai sont des poutres en béton armé reposant sur deux appuis simples. Elles ont la même portée soit 115 cm (5cm de débords). La section droite est rectangulaire de dimensions géométriques suivantes :

Largeur :  $b=12\text{cm}$

Hauteur :  $h=13\text{cm}$

Hauteur utile :  $d=11.5$

**III-4- Choix de ferrailage :** le dimensionnement de la section (ferrailage) est fait de manière à annuler l’effort tranchant par les armatures transversales.

Pour les armatures principales : nous avons utilisé 4 T10.

Pour les armatures transversales : ce sont des cadres en acier T6.

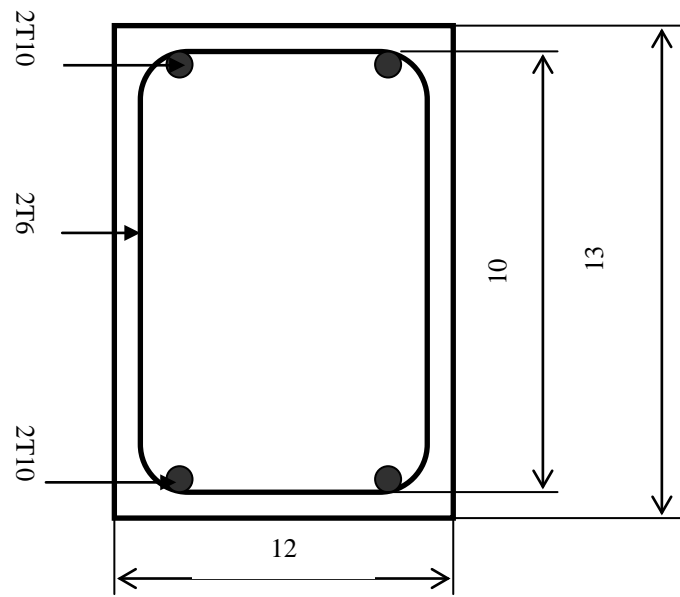


Fig.8-2 Coupe transversale

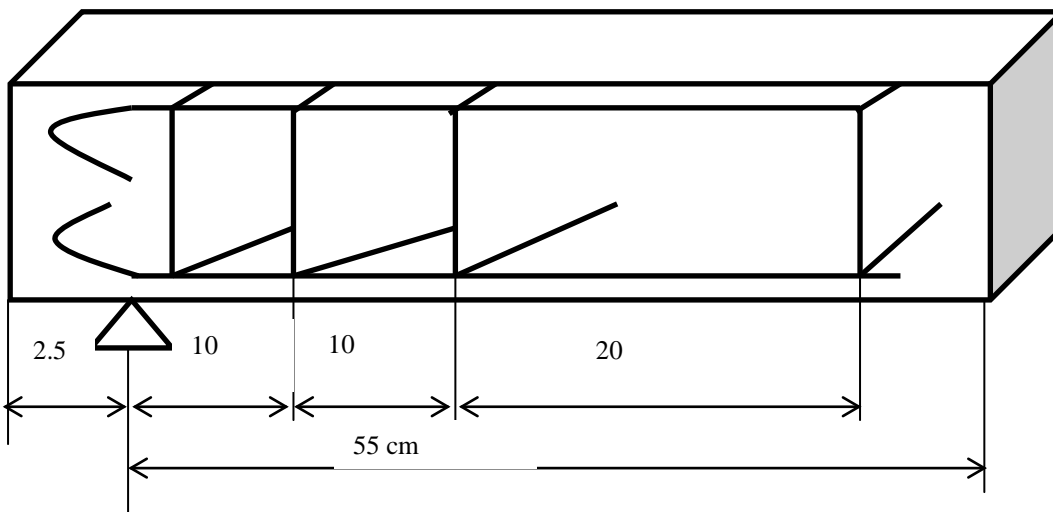


Fig.8-3 : Coupe longitudinale

**III-5- Coulage des poutres :**

Nous avons fabriqué un coffrage en bois qui nous a permis de confectionner quatre poutres. Les parois sont peintes par du vernis afin d'éviter tout gauchissement du bois.

Avant le coulage, les parois en contact avec le béton ont été mouillées. Le malaxage nous a conduit à une coulée qui doit suffire pour fabriquer une poutre et une éprouvette, (7×7×28)cm, destinée à mesurer le retrait. Les moules sont vibrés par l'aiguille vibrante définit auparavant.

**III-6- Décoffrage des poutres :**

Le décoffrage se fait 24 heures après le coulage. Les poutres sont laissées à l'air libre jusqu'au chargement.

**III-7- Appareil d'appui :**

Chaque poutre repose sur un appui simple et un appui double (le diamètre des rondins est 10 cm) (tableau8-1).

**III-8- Type de chargement :**

Une poutre de chaque béton est soumise à une charge statique constante de longue durée(6mois) à mi-travée (tableau8-1).

Les deux autres poutres ne subissent aucun chargement à part leurs poids propres.

Nous avons soumis nos poutres aux essais de retrait et de fluage à partir de la 30<sup>ème</sup> journée à compter de jour de coulage. Tandis que les éprouvettes prélevées sont soumises à des essais de retrait 24 heures après le coulage.

Les poutres sont stockées dans les conditions ambiantes(température et humidité relative) de laboratoire.

**III-9 Mesure et appareils de mesure :**

- *Poutres(flèches)* : les flèches sont déterminées à l'aide de comparateurs de précision de  $10^{-3}$ , situés à 1/4,1/2,3/4 de la travée. En tout point de contact comparateur-poutre, nous avons poncé la surface, par conséquent une déformation uniforme permet de parer à toute erreur de mesure due au déplacement local du comparateur.
- *Eprouvettes(7×7×28)* : les déplacements sont mesurés par des comparateurs. Les surfaces des éprouvettes sont lissées par sciage.

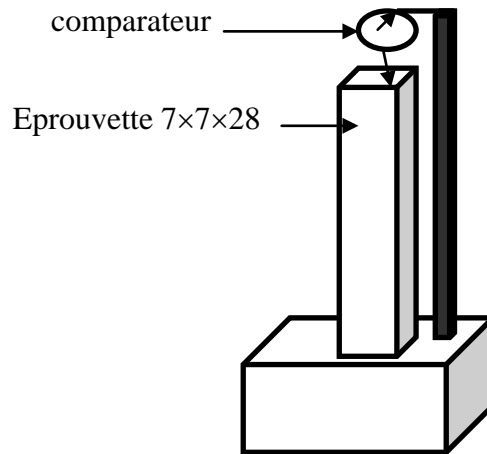


Fig.8-4 : Fluage sur éprouvette

*Remarque :* les comparateurs sont fixés sur des supports magnétiques en acier qui reposent sur des assises en fer très lourdes, pour éviter tout déplacement accidentel

### III-10- Dispositif de chargement et emplacement des comparateurs :

Le schéma ci-dessous montre l'emplacement des comparateurs tout au long de la poutre et le dispositif de chargement.

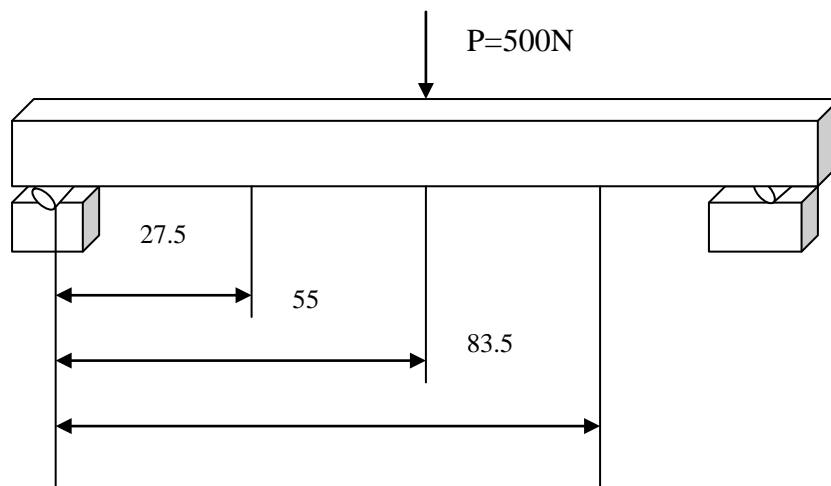


Fig.8-5 : Emplacement des comparateurs

*Remarque :* le même emplacement est réservé aux poutres soumises aux essais de retrait.

### III-11- Flèche instantanée :

La flèche sous charge concentrée au milieu de la poutre est donnée par la formule suivante :  $f = Pl^3/48EI$  (la flèche induite par l'effort tranchant est nulle en utilisant les armatures transversales). Cette flèche une fois mesurée par un comparateur précis, peut être une bonne vérification de notre module d'élasticité auparavant mesuré sur des éprouvettes (16\*32). Les comparateurs placés au voisinage des appuis servent à détecter le tassement de ces derniers, tandis que la flèche est mesurée par le comparateur placé au milieu de la poutre.

**Chapitre IX :****RESULTATS ET INTERPRETATIONS :****PROPRIETES DES BETONS**

---

Nous présentons dans ce chapitre les résultats expérimentaux de notre travail et leurs interprétations.

***I- Propriétés des bétons frais :******I-1- Introduction :***

Lorsque nous avons établi la composition des bétons frais, nous avons essayé de concevoir le même squelette granulaire et le même dosage en ciment. Nous avons uniquement changé le rapport E/C (0.5 pour les bétons ordinaires, 0.35 pour les BHP) et nous avons introduit des superfluidifiants dans la composition du BHP.

Dans ces essais, nous avons conservé le même dosage en superplastifiants (9.375 l/m<sup>3</sup>, 2.5% du poids du ciment). Ce dosage relativement fort a donné une maniabilité considérable (affaissement de l'ordre de 18 cm), avec une quantité d'eau de 150.75 l/m<sup>3</sup>.

Une faible diminution d'eau en gardant le même dosage conduit à des faibles affaissements des bétons. D'où la difficulté qui s'oppose à la formulation du BHP avec une quantité d'eau qui ne dépasse pas 130 l/m<sup>3</sup>.

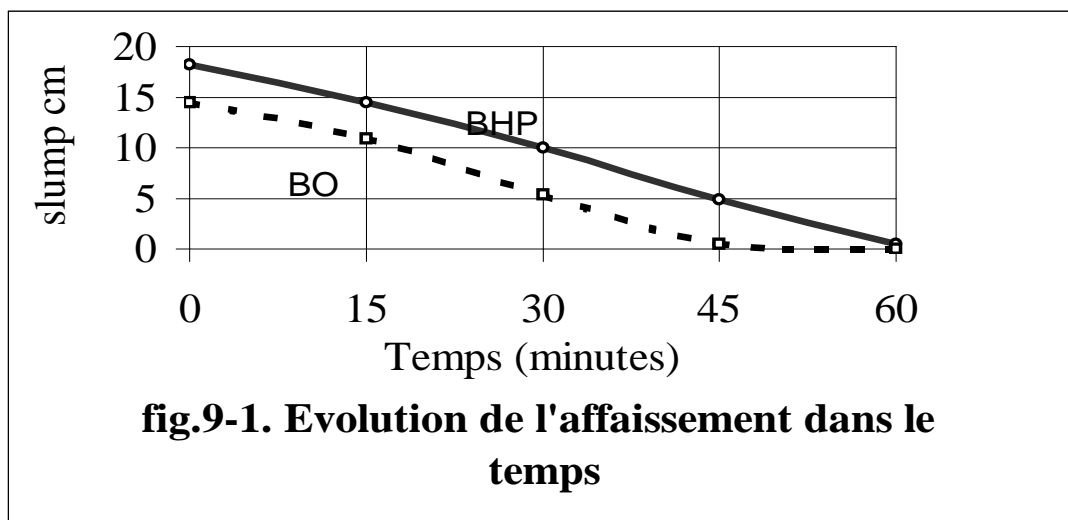
Un ajout de fluidifiant peut conduire à une chute de la résistance. D'autre part, bien que nous ayons choisi un ciment qui possède la plus faible teneur en C<sub>3</sub>A sur le marché, cette teneur reste comme même élevée et nécessite plus d'eau car il est clair que le rapport E/C obtenu

pour un BHP pour une maniabilité donnée dépend de l'activité rhéologique du ciment c'est à dire sa teneur en  $C_3A$ [6].

### I-2- Affaissement du béton et maintien de l'ouvrabilité :

Avant d'être un matériau présentant les qualités mécaniques d'un solide, le béton a été mis en place dans des coffrages. Cette opération doit pouvoir se faire avec le maximum de facilité. D'abord, pour raccourcir le temps de travail nécessaire à la mise en place ; ensuite, pour éviter de découvrir, au moment du décoffrage, des désordres difficilement réparables, voir irréparables, conséquence d'une faible maniabilité du matériau.

La maniabilité est une qualité évolutive dans le temps(avant prise) le graphe ci dessous donne l'évolution des affaissements dans le temps(suivant le slump test NF 18-451[34])



Nous remarquons tout d'abord une différence entre les affaissements mesurés sur les BHP et ceux mesurés sur les BO.

Comme nous pouvons constater sur la figure(9-1) l'affaissement du BHP est plus important que celui du BO, bien que ce dernier possède une quantité d'eau supérieure à celle du BHP. En outre, le BHP conserve sa maniabilité pendant une période plus long que celle des BO, et donc permet sa mise en place dans les coffrages suffisamment longtemps après le malaxage.

Les affaissements enregistrés nous laissent déduire les granulats n'absorbent pas une grande quantité d'eau, d'où l'importance de la quantité d'eau non liée aux grains solides. D'autre part

la quantité de superplastifiants est assez suffisante pour couvrir les grains solides, c'est ce qui a donné une forte maniabilité au BHP.

D'une manière générale, il paraît difficile d'obtenir un affaissement supérieur à 15 cm avec des bétons non adjuvantés sans rencontrer des problèmes de ségrégation (phénomène absent lors de nos essais). D'autre part un BO et un BHP présentant le même affaissement n'ont pas le même comportement rhéologique. Le BO sera plus facile à mettre en place. Alors que le BHP sera très visqueux et d'un maniement un peu difficile par rapport au BO (constatation faite lors de nos essais au laboratoire).

Malgré toutes ces remarques, nous pouvons dire que le comportement rhéologique de nos bétons (BO et BHP) est satisfaisant aux besoins d'un chantier pour la première heure. Car l'objectif de cet essai est de montrer qu'il est possible de transporter ces bétons sur chantier ou ils seront mis en place, sans que nous ayons recourt à rajouter de l'eau.

Il est donc nécessaire de montrer qu'il est possible d'obtenir ces performances, de façon crédible dans les conditions d'un chantier, après les avoir eues au laboratoire. La réponse à cette question reste un champ très intéressant et ouvert à la recherche.

## **II- Propriétés du béton durci :**

### ***II-1 Résistance en compression simple (essai selon NF P18-406)***

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton de l'éprouvette cylindrique donc les extrémités ont été préalablement rectifiées. Cette rectification sert à s'assurer de la planéité des surfaces au contact et de leur perpendicularité aux génératrices de l'éprouvette. Ces éprouvettes ont été conservées sous une couverture humide pendant 7 jours. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

$$f_c = \frac{P}{s} \quad (9-1)$$

Les résultats des essais donnés dans le tableau suivant sont des moyennes arithmétiques de 3 valeurs obtenues lors de 3 essais de compression, à chaque valeur nous associons un écart type qui représente la dispersion des résultats obtenus pour chaque essai. Il est à signaler que

cet écart est causé par des variations dans la fabrication (écarts sur les paramètres de composition), par mûrissement et par la mise à l'essai des éprouvettes de béton.

L'écart type :

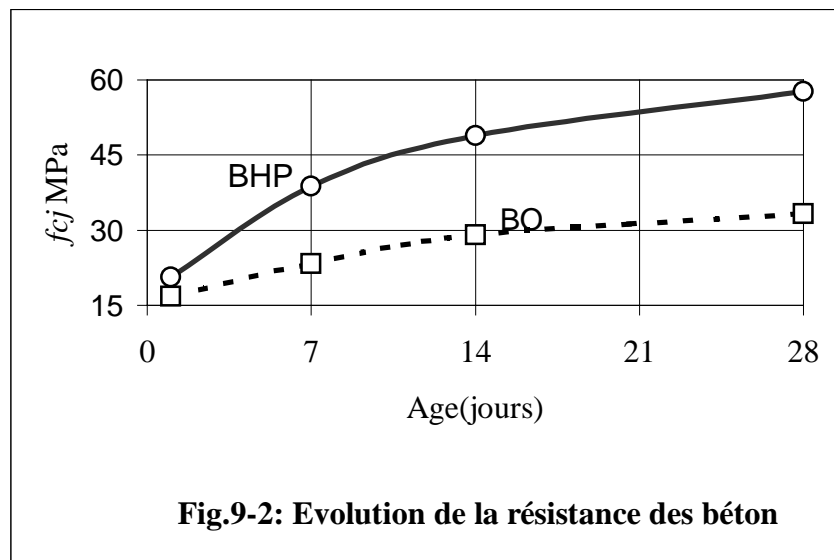
$$\delta^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n |m - f_{ci}|]^2}{n-1} \quad (9-2)$$

Age(jours)	BHP		BO	
	Résistance (Mpa)	Ecart type	Résistance (MPa)	Ecart type
7 jours	38.83	2.44	23.33	0.90
14 jours	48.83	1.5	29	1.5
28 jours	57.67	1.44	33.33	0.94

**Tableau9-1 : Résistances à la compression**

Les résultats indiquent que la résistance en compression augmente lorsque le rapport E/C diminue, pour un âge donné. Nous pouvons encore constater que la résistance en compression ne dépend pas de E/C uniquement, mais, aussi de la qualité des granulats. En effet la résistance en compression pour le béton ordinaire dépasse la résistance habituelle des bétons qui reste, en général, inférieure à 30 MPa. Cependant, nous remarquons que la résistance des bétons ordinaires à 28 jours est nettement inférieure à celle des BHP à 7 jours d'où l'intérêt du BHP en matière de gain rapide de résistance suffisante et donc maturité.

Le graphe (9-2) montre l'évolution des résistances et un gain plus rapide et plus important pour les BHP comparativement aux BO.  $f_{cj}$  est la résistance à la compression exprimée en MPa.



Le tableau (9-2) donne le rapport des résistances de différents âges.

Rapport	BHP	BO
$F_{c28} / f_{c7}$	1.48	1.43
$F_{c28} / F_{c14}$	1.18	1.15
$F_{c14} / F_{c7}$	1.27	1.24

**Tableau9-2 : Rapport des résistances en compression.**

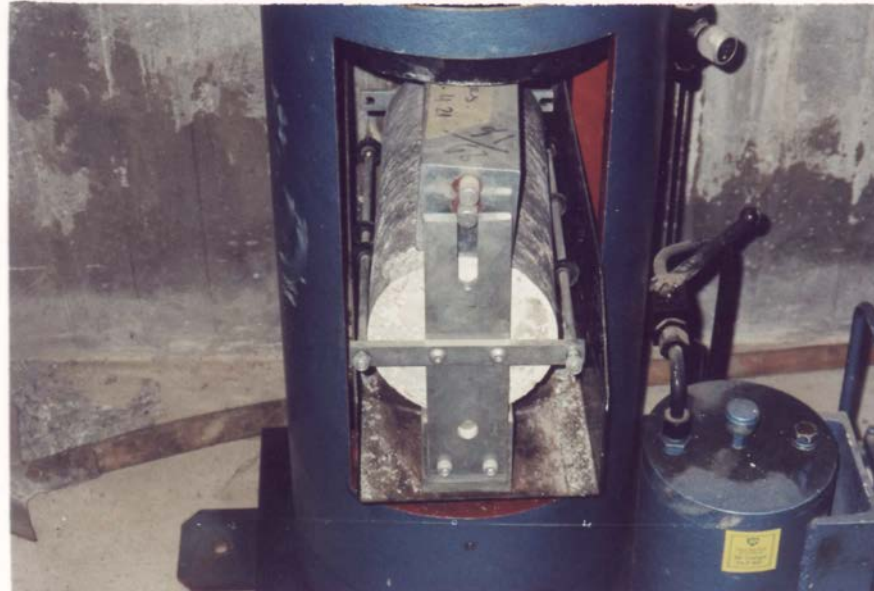
Les rapports donnés dans ce tableau sont en faveur des BHP. En effet, pour les BHP nous constatons une augmentation de 48% de 7 à 28 jours par rapport à 43% de la résistance des BO. Les résistances obtenues justifient le choix des fluidifiants ; ces derniers n'ont pas réagi de manière néfaste dans le BHP, c'est-à-dire, que le couple ciment- fluidifiant n'engendre aucune réaction chimique qui peut réduire la résistance en compression ce qui a été reporté dans certains travaux.

- **Particularité de la rupture en compression :**

Dans la rupture des BHP, deux cônes apparaissent aux extrémités de l'éprouvette rompue. En effet, la pression exercée par les plateaux de la presse à la jonction avec l'éprouvette gêne les déformations transversales dans cette zone. La déformation transversale dans la zone centrale résulte des contraintes de la traction perpendiculaires à la compression. Ce sont ces contraintes de traction qui aboutissent dans la zone centrale à la fissuration longitudinale puis à la ruine de l'éprouvette.

**II-2 Résistance à la traction :**

Les essais sont effectués sur des éprouvettes cylindriques 16×32, en utilisant la même presse que celle utilisée pour la compression simple, moyennant le dispositif nécessaire pour la réalisation des essais à la traction par fendage (figure 9-2).



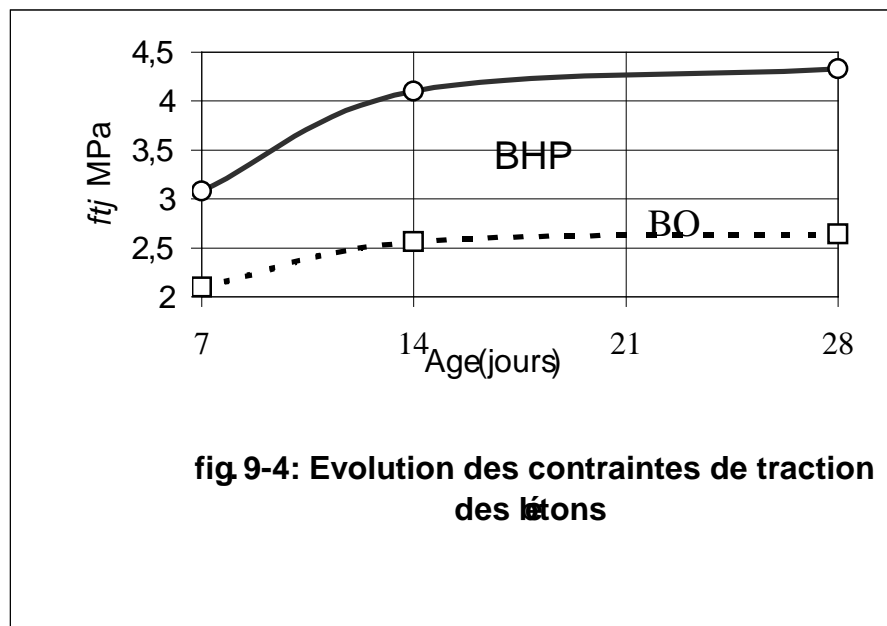
**Fig9-3 : Dispositif de l'essai de traction par fendage**

Les résistances moyennes à la traction par fendage sont données, pour des différents âges 7,14 et 28 jours, dans le tableau (9-3) :

Ages	Traction par fendage		
	7 jours	14 jours	28 jours
Bétons ordinaires	2.1	2.56	2.64
BHP	3.08	4.1	4.33

**Tableau9-3 : Résistances en traction.**

Le figure (9-4) présente l'évolution de la contrainte en traction dans le temps( $f_{tj}$ ) exprimée en MPa



**fig 9-4: Evolution des contraintes de traction des bétons**

En analysant ces résultats, nous constatons une croissance de la résistance à la traction par fendage avec l'augmentation de la résistance à la compression, mais elle ne s'améliore pas dans les mêmes proportions. Cependant la résistance à la traction par fendage croît de manière insignifiante surtout de 14 à 28 jours, contrairement à la résistance à la compression. Ceci peut être expliqué par «l'état de traction de la matrice», dont le retrait est empêché par les granulats.

En outre, nous constatons que la résistance à la traction dans les BHP est très grande en la comparant à celle des BO. Malheureusement elle reste comparativement faible pour que nous puissions utiliser les BHP pour remplir des tâches nécessitant des résistances importantes à la traction et donc le ferrailage de la partie tendue reste indispensable.

L'examen du tableau (9-4) montre le rapport entre la résistance à la traction et la résistance à la compression.

Rapport	Béton ordinaire	BHP
$F_{t7} / f_{c7}$	0.090	0.098
$F_{t14} / f_{c14}$	0.088	0.084
$F_{t28} / f_{c28}$	0.079	0.075

**Tableau9-4 : rapport des résistances en traction et celles en compression.**

Nous remarquons une diminution du rapport  $F_{tj} / f_{cj}$  lorsque les bétons vieillissent. Cela veut dire que la résistance à la compression évolue mieux dans le temps que celle à la traction.

Une comparaison simple entre les résultats obtenus et le modèle proposé par le BAEL pour la traction montre une surestimation de la valeur de cette résistance pour un BHP.

Ceci peut mettre la sécurité, l'objectif principal de toutes les conceptions, à risque. D'où le recours à des nouvelles formules citées dans la synthèse bibliographique. Cependant la formule BAEL reste sécuritaire pour les BO.

Lors des essais de fendage, la rupture se produit de façon brutale, ce qui dénote la fragilité des BHP telle que reporté dans la littérature.

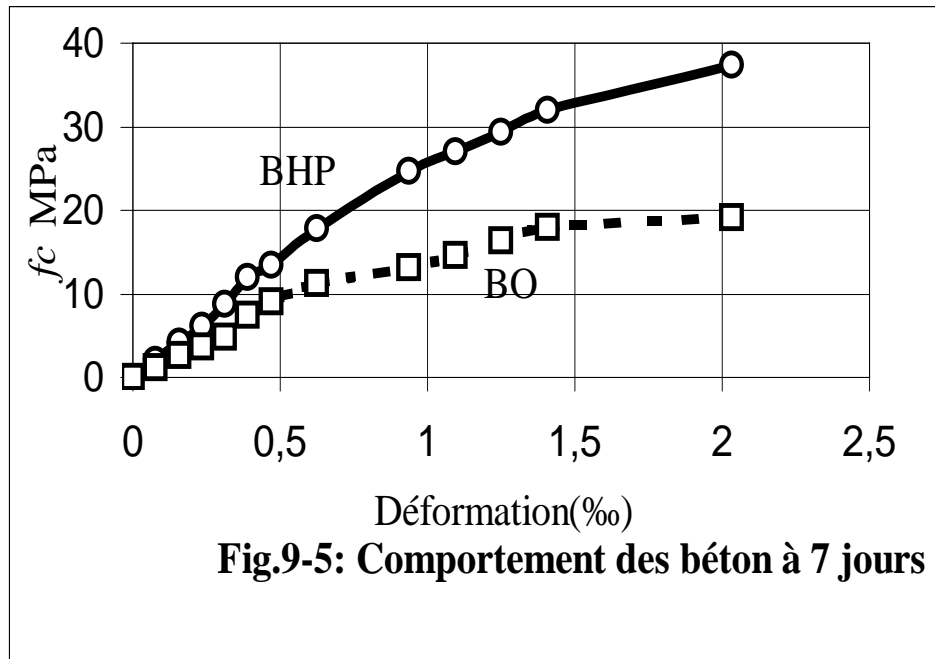
### **III- Déformations instantanées :**

#### ***III-1 Courbe contraintes-déformations des bétons à 7,14 et 28 jours :***

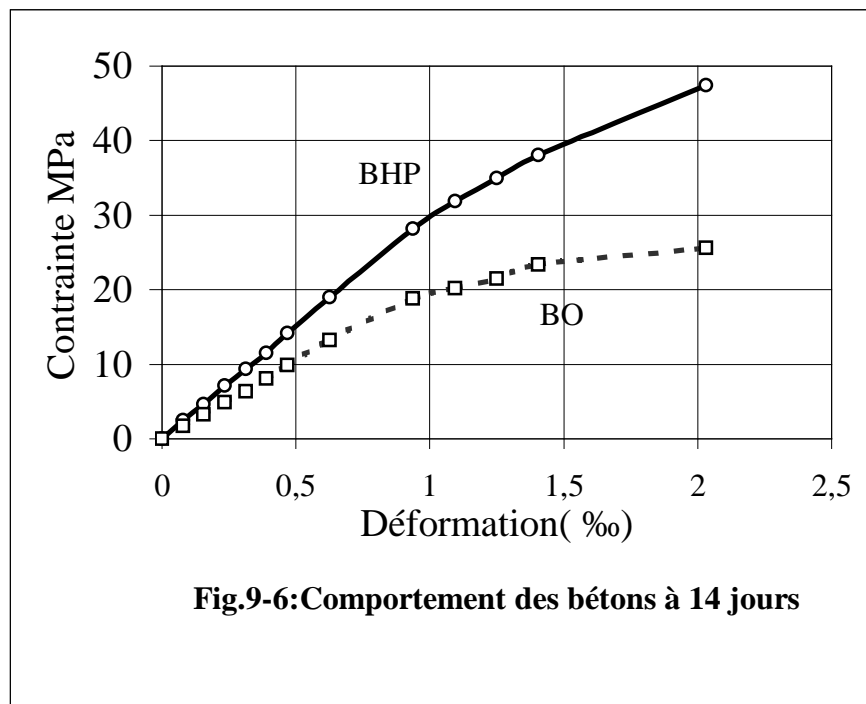
La courbe lissée  $\sigma$ - $\varepsilon$  des BHP et celle des BO sont données dans le même graphe en fonction de l'âge pour des différents âges (fig.9-5 ; fig. 9-6 ; fig. 9-7).

Les essais sont faits au L.N.H.C et nous n'avons pris que des faibles déformations, car quand nous arrivons à certaines valeurs de contrainte, nous n'arrivons plus à lire les valeurs des déformations, vu la vitesse de ces dernières.

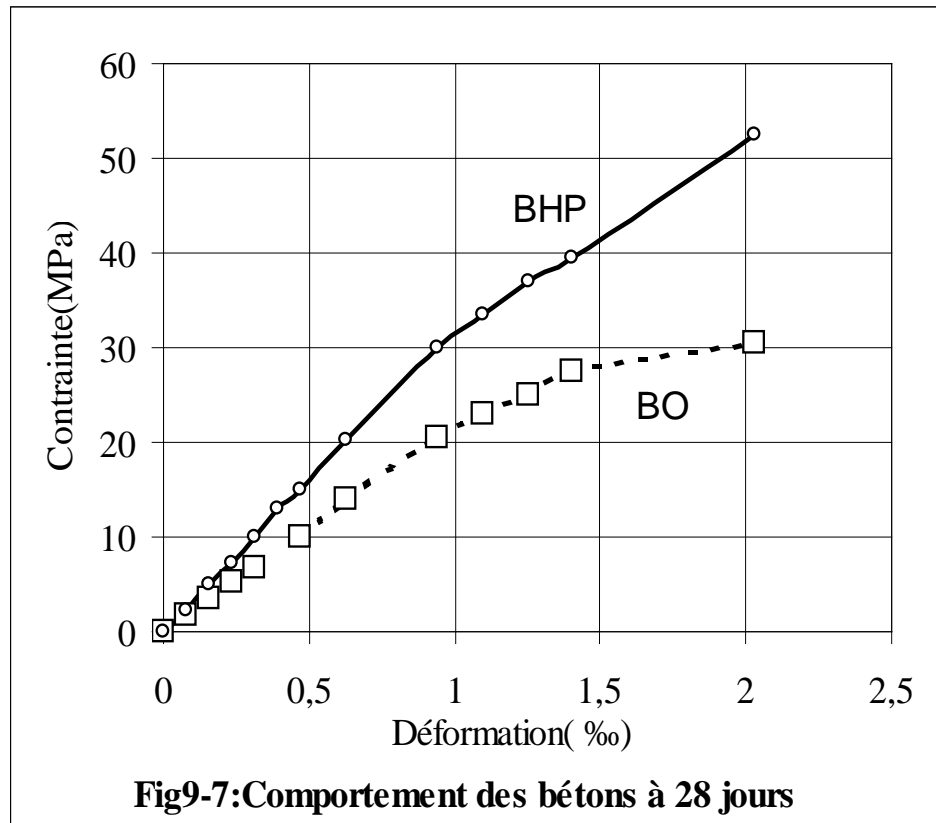
Le graphe (9-5) présente le comportement des bétons (BO et BHP) à 7 jours.



Les courbes contrainte déformation des bétons à 14 jours sont présentées dans la figure (9-6).



Les comportements des bétons à 28 jours sont présentés par la figure(9-7).



Ce que nous pouvons déduire de ces graphes, c'est que pour les mêmes contraintes les BO se déforment beaucoup plus que les BHP. Cela est dû essentiellement à la structure compacte des BHP et son absence de ductilité.

Comme nous remarquons que lorsque la contrainte de rupture augmente la courbe devient de plus en plus droite et se prolonge pratiquement jusqu'à la rupture, laquelle est du type fragile. Ainsi le module sécant (mesuré en général à 1/6 de la résistance) et le module tangent (mesuré en général à l'origine) sont quasiment confondus.

Nous pouvons ajouter aussi que la microstructure des matrices à hautes performances a une caractéristique principale qui est la distribution des pores, et que la porosité dans les BHP

devient très resserrées. En diminuant la quantité d'eau de malaxage pour les BHP, celle-ci se rapproche de celle strictement nécessaire à l'hydratation du ciment et donc est liée chimiquement. La quantité d'eau restant dans les pores est réduite au strict minimum réduisant ainsi les vides après évaporation et limitant les déformations d'où l'absence de ductilité pour les BHP.

## II-2 Module d'élasticité :

Pour de petites déformations du béton, la courbe contrainte-déformation peut être assimilée à une droite. Il y a approximativement proportionnalité entre la contrainte  $\sigma_c$  et la déformation  $\varepsilon_c$ . Soit  $E_c$  ce coefficient de proportionnalité :

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c.$$

Soit  $f_c$  la résistance à la compression du béton étudié. Il s'agit d'appliquer des contraintes croissantes à une éprouvette de ce béton et de mesurer les déformations correspondantes, jusqu'à une valeur  $\sigma_c = 0.6 f_c$ . Il est alors possible de tracer la courbe  $\sigma_c = f(\varepsilon_c)$ . La pente de la tangente à l'origine (module tangent) est le module d'élasticité recherché (voir annexe 6).

Les modules d'élasticité sont mesurés sur des éprouvettes (16×32) destinées à l'essai de compression le dispositif de mesure est le même que celui des déformations axiales.

Les valeurs de E sont déduites des graphes des déformations axiales.

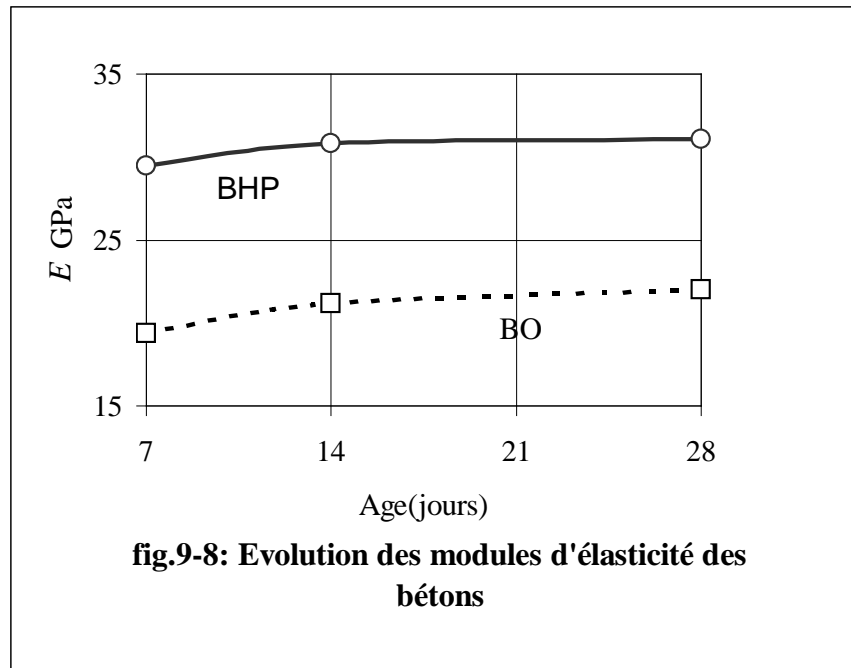
Type	7jours	14jours	28jours
E(BHP) Gpa	29.5	30.8	31.9
E(BO) GPa	19.4	21.2	22.0

**Tableau9-5 : les modules d'élasticité.**

Les résultats montrent une tendance à l'accroissement du module d'élasticité lorsque la résistance en compression augmente. Cependant, cet accroissement n'est pas dans les mêmes proportions que celui des résistances à la compression.

Nous notons que le module d'élasticité des BHP à 7 jours dépasse celui des BO à 28 jours, comme pour les résistances à la compression. .

Il est clair, d'après les valeurs mentionnées dans le tableau(9-5), que le module d'élasticité des BHP est nettement supérieur à celui des BO. Cela est dû à la diminution des vides dans la structure des BHP et donc des déformations une fois le matériau sous charge. L'évolution des modules d'élasticité des bétons est schématisée sur la figure(9-8), notant que  $E$  est le module en GPa



En prenant les résultats expérimentaux des modules d'élasticité et les valeurs théoriques prédites par le règlement BAEL, nous remarquons que les bétons ordinaires repennent à ces formules empiriques. Cependant les règlements BAEL sont irréalistes et non sécuritaires du fait qu'ils surestiment largement le module d'élasticité pour les BHP.

Cependant, les modèles proposés par ACI et par YAYA DIATA[9] semblent acceptables pour le BHP(voir chapitre3, paragrapheII-9).

Donc, le règlement BAEL ne peut avoir extrapolé pour le BHP, du moins selon notre expérimentation.

La conclusion qui se dégage de ces expérimentations c'est que le module d'élasticité  $E_c$  ne croit pas dans les mêmes proportions que la résistance de compression. Donc déjà nous pouvons affirmer que pour les BHP, nous ne pouvons pas dire que son module  $E_c$  est triple ni

même le doubler de celui des BO même si la résistance à la compression passe de (25 à 30 MPa) pour les BO à plus de 90 MPa pour les BHP.

**Chapitre X :****RESULTATS ET INTERPRETATION****DEFORMATIONS DIFFEREES****I- Introduction :**

Nous présentons ici deux types d'essais, ainsi que de nombreuses données expérimentales, portant sur les déformations des bétons à hautes performances et des bétons ordinaires.

Le premier type a pour but de déterminer le retrait sur des éprouvettes (7×7×28) en fonction de l'âge pour les deux types de bétons. Tandis que le deuxième nous a servi à déterminer l'amplitude du retrait et du fluage sur des poutres (élément long et ferrillé). Vu qu'il est difficile de découpler les différents types de fluage et de retrait, nous avons été contraints de travailler avec leurs valeurs totales.

Notre but est de comparer le comportement vis-à-vis des déformations différées des BHP et celui des BO. Sachant que ces derniers sont soumis aux mêmes conditions climatiques au laboratoire, il n'y a pas lieu de tenir compte du paramètre température et humidité.

**II- Retrait sur éprouvettes :****II-1 Introduction :**

Le retrait et la somme du retrait endogène et du retrait de dessiccation.

Le mécanisme de retrait endogène a été décrit en détail dans <sup>10</sup>. Il a pour origine la contraction LE CHATELIER, qui a pour cause un volume des produits de l'hydratation réduit par rapport à celui des réactifs. Après la prise du squelette des

hydrates fait apparaître, par le gêne qu'il apporte aux déformations, une dépression dans l'eau interstitielle.

Le mécanisme du retrait de dessiccation est dû à une différence d'humidité relative entre le milieu extérieur et le matériau<sup>10,11,12</sup>. Ce déséquilibre engendre une diffusion de la vapeur vers le milieu où l'humidité relative est plus faible.

## II-2 Essai

Les éprouvettes (7×7×28) sont mises en essai après le démoulage (24 heures après le coulage).

Les surfaces sont poncées pour assurer un bon contact entre l'aiguille de comparateur et le béton. L'éprouvette est placée dans une position stable, pour éviter tout imprévu lors de l'essai. Les comparateurs utilisés sont de 0.002mm de précision, cela facilite la détection des faibles déformations.

Le retrait est calculé par la formule suivante :

$$\varepsilon_{re} 10^{-3} = \frac{\Delta l(\text{micromètre})}{l(\text{mètre})}. \quad (10-1)$$

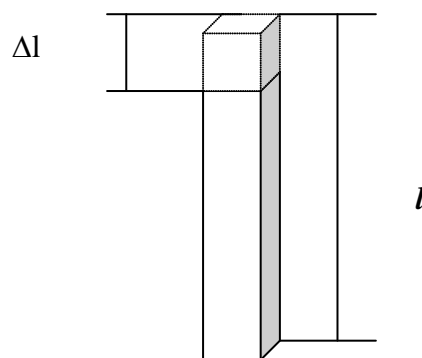


Fig.10-1 : Déformation du retrait

**II-3 Conclusion:**

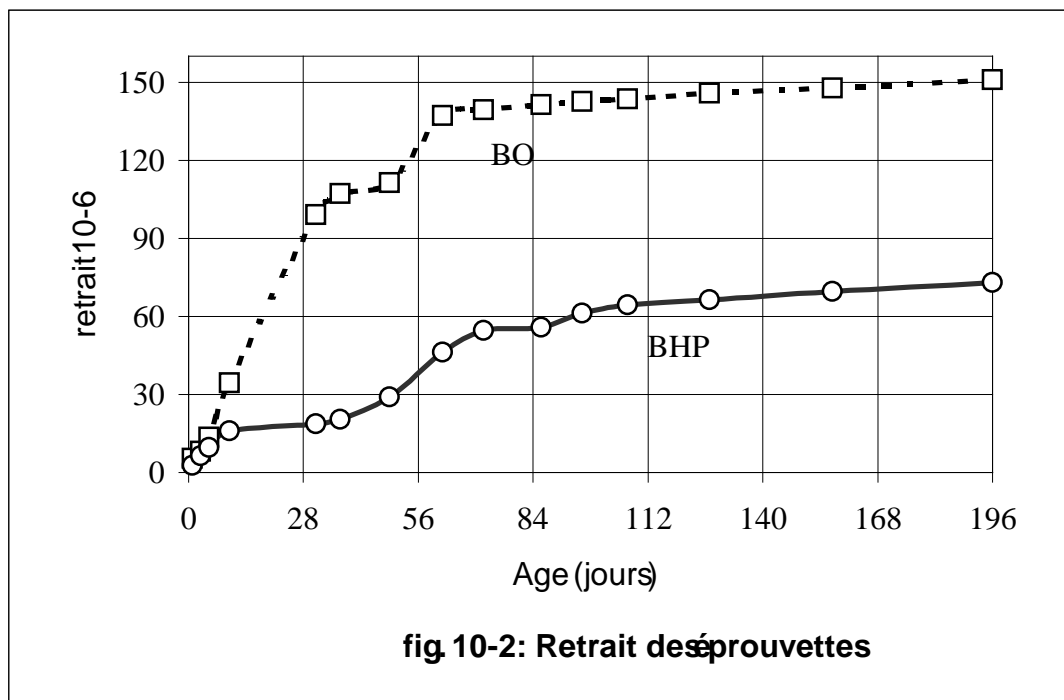
Nous donnons dans le tableau suivant quelques amplitudes de retrait prises dans des différents âges du béton : les valeurs sont estimées en ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )

Age (jours)	1	3	5	10	31	37	49
$\epsilon(\text{BO})$	5.35	8.035	13.40	34.30	99.11	107.15	111.42
$\epsilon(\text{BHP})$	2.7	6.43	9.64	16.07	18.75	20.36	28.93

Age (jours)	62	72	86	96	107	127	157	196
$\epsilon(\text{BO})$	137.14	139.28	141.43	142.5	143.6	145.71	147.6	151
$\epsilon(\text{BHP})$	46.1	54.64	55.71	61.1	64.28	66.43	69.64	72.9

**Tableau10-1: Retrait des éprouvettes en fonction de l'âge**

Les résultats sont donné dans le graphe ci-dessous:  $10^{-6}$



**fig. 10-2: Retrait des éprouvettes**

Nous remarquons que l'amplitude de retrait des BO et celle des BHP sont très différentes dès le premier jour, en effet le rapport entre les deux retraits est de 1.5 à 2. Mais à partir de la dixième journée la différence devient de plus en plus grande, elle atteint même plus que le triple à 50 jours. Puis à la fin de l'essai, le rapport s'approche de plus en plus de 2.

Nous remarquons aussi que l'amplitude du retrait cesse presque de croître à partir de 90 jours, nous pouvons constater que le retrait croît 10 fois du 1<sup>er</sup> jour au 28<sup>ème</sup> jour, ce taux de croissance s'atténue clairement au de la de 56 jours.

Comparativement aux BO, les déformations de retrait BHP diffèrent de la manière suivante :

- Le retrait endogène se développe de manière plus rapide à cause d'un durcissement également plus rapide.
- Le retrait de dessiccation est plus faible, et ce d'autant que le rapport E/C est faible.

Mais la somme des deux retraits donne une amplitude plus faible pour les BHP par comparaison aux BO à cause de la faible quantité d'eau.

Une comparaison des résultats obtenus par l'expérimentation et celles des modèles théoriques donnés en <sup>10</sup>, fait sortir une sécurité du fait que l'amplitude du retrait donnée par l'expérimentation est plus faible de celle donnée par la théorie.

### ***III- Fluage et retrait des éléments longs :***

#### ***III-1 Introduction :***

Nous rappelons que le fluage est scindé en deux types de déformations. La première est le fluage propre ; apparaissant lorsque l'échantillon est protégé contre le séchage, et la seconde est le fluage de dessiccation, qui est la différence de déformation due au chargement, entre une éprouvette séchante et une autre protégée de la dessiccation.

Nous précisons que c'est une manière commode d'exploiter les résultats expérimentaux et qu'à défaut de modèle plus général, couvrant tous les types de conditions aux limites, nous décomposons le phénomène en ces deux parties.

### III-2 Essai :

L'essai est fait sur 4 poutres, deux chargée et deux autres prises comme témoins afin de découpler les déformations(retrait et fluage). Par manque de moyen nous n'avons pas pu séparer les deux types de fluage.

Pour pouvoir calculer le fluage nous utilisons la formule suivante[15] :

$$\varepsilon_{flu} = \left( \left( \frac{f'}{l/2} - \frac{f}{l/2} \right) / 2 \right) - \varepsilon_{ret}$$

Où :

$f'$  : la flèche totale

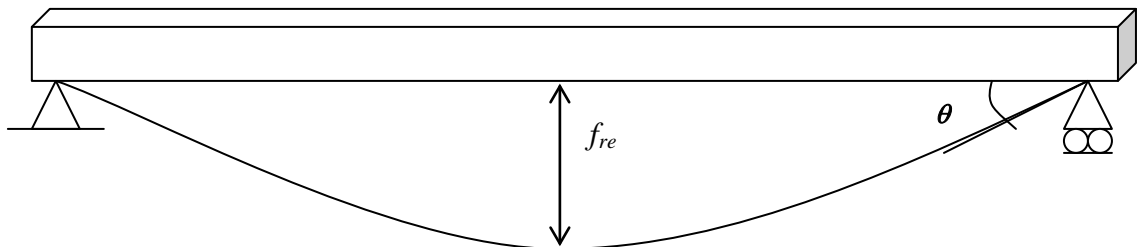
$f$  : la flèche instantanée

$\varepsilon_{ret}$  : déformation de retrait

$$\varepsilon_{ret} = \frac{f_{ret}}{l/2}$$

Où  $f_{ret}$  est la flèche due au retrait uniquement.

### III-3- Retrait des poutres :



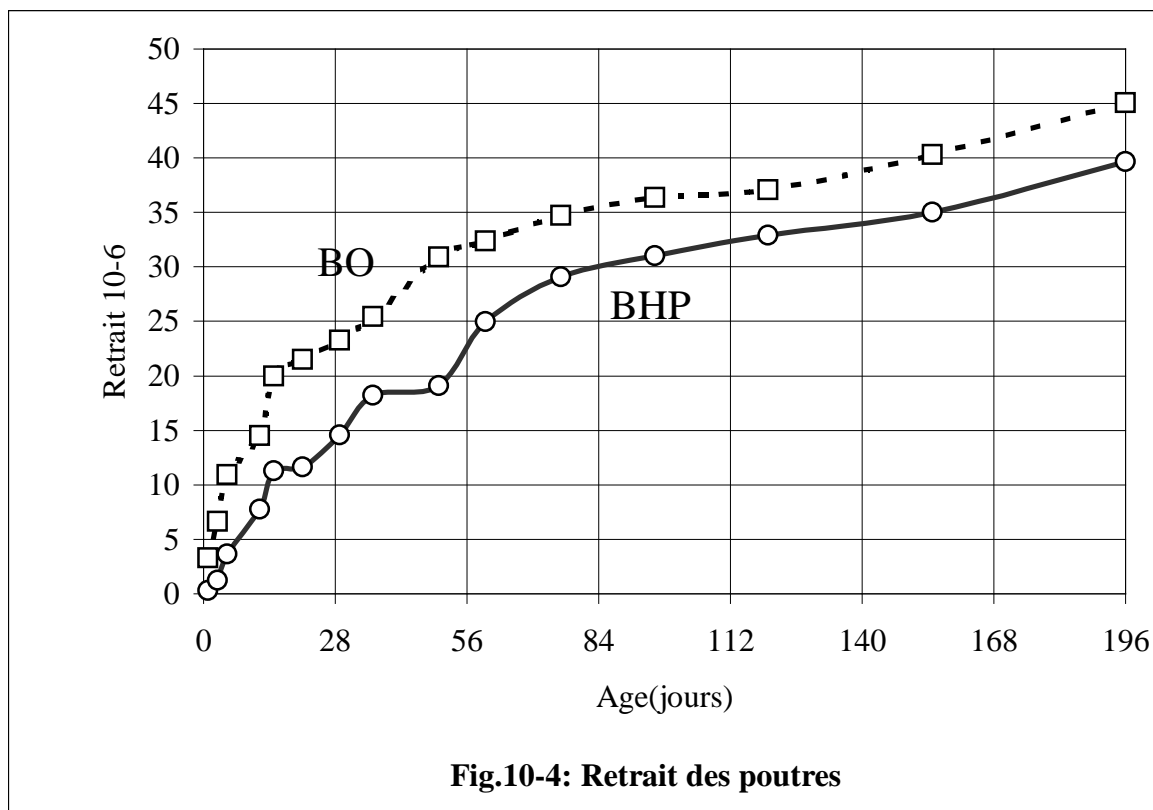
**Fig.10-3 : Mesure de la flèche due au retrait**

Les poutres sont mises en essais à la 30eme journée après le coulage. Les valeurs sont estimées en ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )

Age (jours)	1	3	5	12	15	21	29
$\epsilon(\text{BO})$	3.28	6.61	10.9	14.54	20	21.5	23.28
$\epsilon(\text{BHP})$	0.3	1.22	3.64	7.76	11.28	11.62	14.6

Age (jours)	36	50	60	76	96	120	155	196
$\epsilon(\text{BO})$	25.44	30.92	32.36	34.72	36.36	37.1	40.13	45.05
$\epsilon(\text{BHP})$	18.2	19.1	25	29.1	31.04	32.88	35	39.64

**Tableau 10-2 : Retrait des poutres**



**Fig.10-4: Retrait des poutres**

Nous remarquons que l'amplitude du retrait des BHP est nettement inférieure à celle des BO dans les premiers jours. En effet, le dosage du ciment est le même pour les deux bétons, tandis que le rapport de la masse d'eau à la masse de liant des BHP est inférieur à celui des BO.

D'un coté l'augmentation de la quantité de ciment augmente la valeur du retrait, ce qui ne fait pas la différence car nous avons le même dosage en ciment, mais de l'autre coté, la réduction d'eau diminue les vides pouvant être générés à l'intérieur de la structure. Par conséquent, l'amplitude finale du retrait des BHP est inférieure à celle des BO.

#### **III-4- Fluage des poutres :**

Les poutres ont été chargées au 30<sup>ème</sup> jour de leurs âges. Les déformations dues au fluage sont mesurées par un comparateur situé au milieu de la distance entre-appuis.

La flèche instantanée est déterminée par la formule suivante :

$$f = PL^3 / 48EI.$$

Les poutres ont été chargées par une force de 50 Kg soit 500 N, la contrainte induite par cette charge est :

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

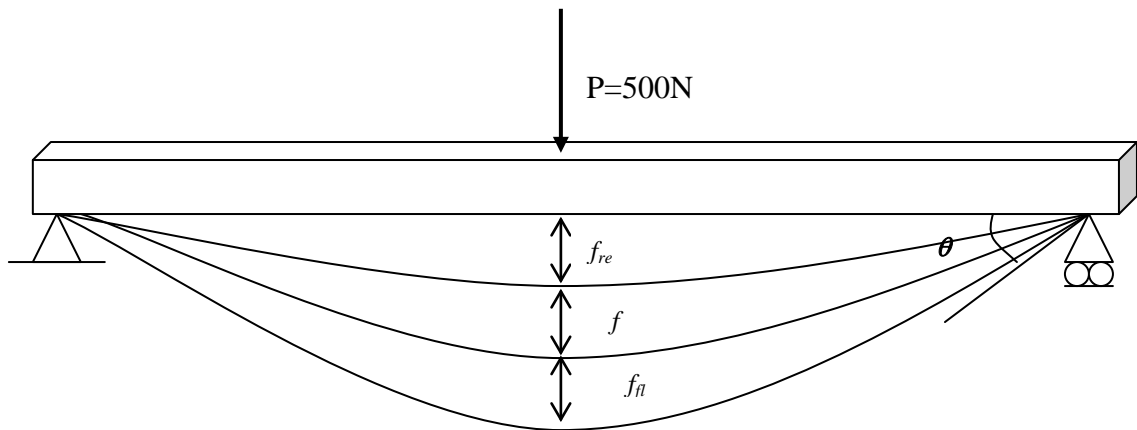
Où : M est le moment induit par la charge au milieu de la poutre  $M = (Pl)/4$

V : est la distance entre l'axe neutre de la poutre et la fibre tendue

$I = (bh^3)/12$ , où b, h sont respectivement la largeur et la hauteur de la poutre

La contrainte  $\sigma$  doit être entre 30 et 70% de la résistance à la compression des bétons.

Pour des petites déformations, nous pouvons assimiler l'angle  $\theta$  à sa tangente et cela dans le but de faciliter les calculs des déformations dues au fluage.



**Fig.10-5 : Mesure de la flèche due au fluage**

Avant de passer en revue les résultats obtenus, il est important de citer quelques remarques :

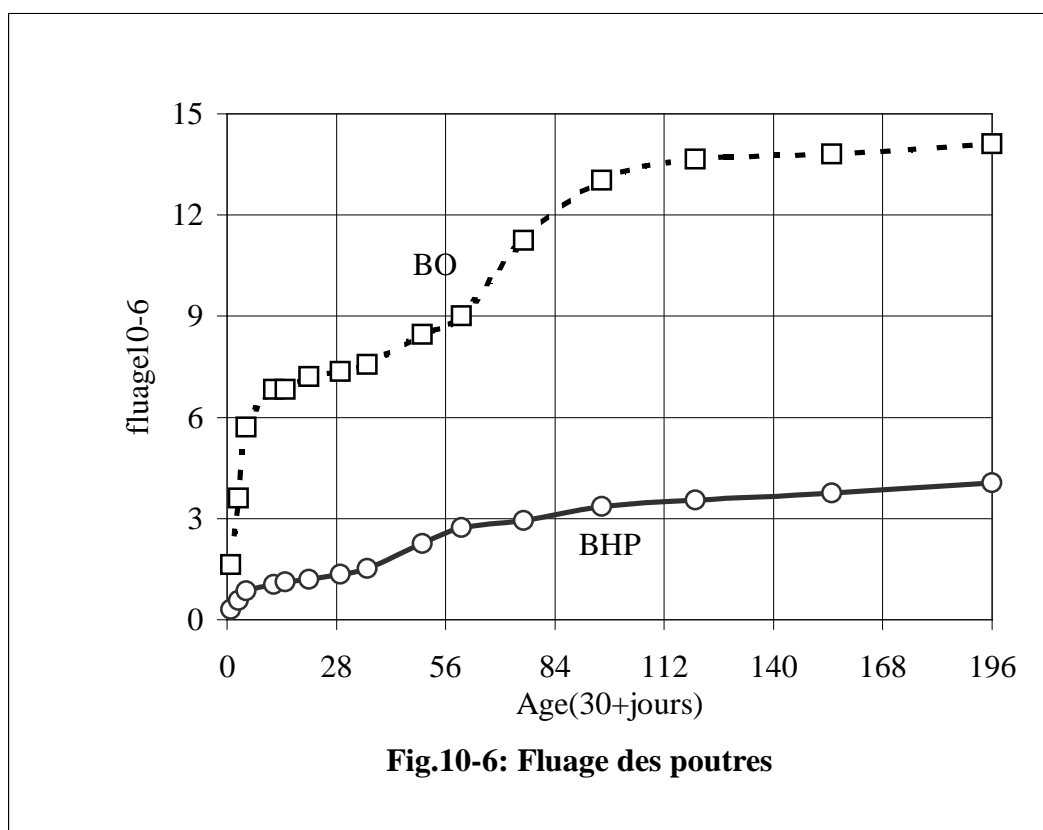
- Pendant toute la période d'essai, nous n'avons constaté aucune fissure sur nos éprouvettes
- Nous avons placé des comparateurs près des appuis afin de détecter des tassements de ces derniers qui peuvent survenir lors de chargement ou au cours de l'essai de fluage.

Les valeurs du fluage exprimées en ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) sont données sur le tableau (10-3) est schématisées sur la figure(10-6)

Age(jour)	1	3	5	12	15	21	29
BO	1.64	3.6	5.7	6.82	6.82	7.2	7.35
BHP	0.3	0.56	0.86	1.05	1.12	1.2	1.35

Age(jour)	36	50	60	76	96	120	155	196
BO	7.65	8.46	9	11.25	13.025	13.65	13.8	14.1
BHP	1.52	2.25	2.73	2.96	3.36	3.55	3.75	4.05

**Tableau 10-3 : Fluage des poutres**



**Fig.10-6: Fluage des poutres**

Au vu des résultats présentes dans le tableau 10-3 et le graphe 10-4, nous constatons que le fluage des BHP est nettement plus faible que celui des BO. Ceci est dû essentiellement au faible rapport E/C des BHP. En effet, le fluage est essentiellement causé par le départ d'eau qui n'a pas servi à l'hydratation une fois la charge appliquée est maintenue, cette eau en surplus est réduite au strict minimum dans les BHP. A la fin des essais (plus de six mois), le fluage des BHP est le 1/3 de celui pour les bétons ordinaires. Les BHP sont aussi des matériaux qui s'adaptent très bien pour les structures où les déformations différées par fluage et par retrait sont déterminantes comme paramètres de conception.

Une comparaison de nos résultats obtenus sur les poutres en béton ordinaire, avec ceux obtenus par GAUCHER<sup>15</sup> montre que le fluage de nos poutres est plus faible. Cela peut être expliqué par le fait que nos poutres sont ferrillées et chargées au 30<sup>èmes</sup> jour de leurs âges. En effet, d'un côté le ferrillage supporte une partie de la charge et l'adhérence acier-béton empêche les déformations dues au fluage ; de l'autre côté

le mûrissement de la pâte de ciment donne une bonne cohésion entre les granulats et par conséquent diminue les déformations différées.

La somme de la déformation du retrait et celle du fluage pour les BHP est plus faible par rapport à la somme des deux déformations des bétons ordinaires. Cela nous permet de dire que les BHP sont plus aptes à supporter les déformations différées que les BO. Ceci résulte de la structure dense c'est à dire la diminution des vides dans les BHP.

## **CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS**

---

### **I-Conclusion :**

L'objectif de cette étude est l'élaboration d'un béton à hautes performances avec des matériaux locaux et simplement adjuvés, ainsi que sa caractérisation par l'étude de ces propriétés surtout le retrait et le fluage. Cette caractérisation est entreprise en se référant aux propriétés d'un béton ordinaire ayant le même squelette granulaire et sans ajout de superplastifiant.

L'obtention d'une haute performance consiste surtout en l'obtention d'un béton résistant (résistance dépassant les 50MPa), maniable (slumps dépassant les 16cm) et durable.

Dans la première partie, nous avons fait une large investigation dans les carrières, les cimenteries, et même dans des entreprises de construction pour que nous puissions faire une sélection des matériaux pouvant servir à confectionner ce béton. Ceci fait, notre premier objectif était de mélanger ces matériaux en utilisant un faible dosage en eau (E/C à 0.35). Pour se faire, nous avons appliqué la méthode de FAURY afin de déterminer approximativement les dosages de granulats, puis nous avons corrigé ces proportions à l'aide de maniabilimètre L.C.L.

Une fois la composition est déterminée nous sommes passé à la confection de ce BHP et à l'étude de ces propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Comme béton témoin servant de comparaison, un béton ordinaire avec E/C=0.5 a été confectionné.

Pour un rapport E/C égale à 0.35 les bétons fabriqués avec un ciment CPJ45 présente des propriétés plus performantes (résistances >57MPa, module d'élasticité >31GPa) par rapport à

des bétons avec  $E/C=0.5$  et sans adjuvant (résistance = 33MPa, module d'élasticité = 22 GPa). Toutefois ce niveau de résistance reste toujours difficile à atteindre car nous avons observé des ruptures des granulats lors des essais d'écrasement. Cela dit, la résistance d'un béton ne dépend pas uniquement de  $E/C$  mais aussi de la qualité des granulats utilisés dans la fabrication de ce béton. En effet, pour produire un BHP il faut au moins des granulats qui ne se cassent pas avant la pâte de ciment durcie.

Le couple ciment/adjuvant utilisé dans cette formulation a donné des bons résultats sur le plan résistance, car nous n'avons pas eu des réactions qui peuvent affecter la résistance. Sur le plan maniabilité, nous remarquons que le béton reste maniable pendant une heure après le malaxage, ce qui nous permet de le transporter sur chantier et de le mettre en place (dans les moules) sans avoir recours à un ajout d'eau.

Les résultats expérimentaux présentés dans le dernier chapitre de ce travail mettent en évidence la meilleure aptitude, en condition de laboratoire, du BHP à supporter les déformations différées comparativement au béton ordinaire. Ces résultats qui nécessitent d'être supportés encore plus ont montré que le BHP est un matériau qui se comporte bien vis-à-vis des déformations différées et donc peut constituer la solution à des problèmes de déformation à long terme en plus de sa bonne résistance et dès les premiers âges.

Ces propriétés des BHP résultent de la microstructure caractérisée par sa compacité (faible porosité totale et faible rayon de pores) et donc de son imperméabilité. Ceci résulte du faible rapport  $E/C$  qui se rapproche de celui strictement nécessaire à l'hydratation du ciment.

Bien que la littérature stipule que le retrait endogène des BHP est plus élevé à cause du fort dosage en ciment, nous remarquons que le BO a un retrait total à long terme supérieur à celui des BHP. Car dans notre cas le dosage en ciment est le même pour les deux bétons, tandis que le  $E/C$  des BHP est plus faible, notant que l'augmentation de la quantité de ciment augmente le retrait mais la diminution du rapport  $E/C$  diminue le retrait[10]. Cependant la différence entre le retrait des poutres est serrée, cela est dû à l'humidité relative qui s'approche de 65%.

Le fluage des poutres en BHP est plus faible que celui des poutres en BO, nous pouvons même dire que le fluage des poutres en BHP est très faible. Cela peut s'expliquer par le fait que la quantité d'eau à mouvement libre est très réduite dans le cas des BHP.

Aussi et à des niveaux de contraintes semblables le rapport contrainte/résistance est faible dans les BHP par comparaison au BO ; Le fluage étant directement proportionnel au rapport contrainte/résistance.

Les modèles empiriques exposés dans la littérature <sup>10,11,12</sup> donnent une estimation acceptable pour le retrait et le fluage du fait qu'ils sont sécuritaires. Le seul inconvénient est que nous devons, à chaque instant, connaître la résistance du béton ; ce qui rend leur utilisation peu pratique.

## **II- Recommandations :**

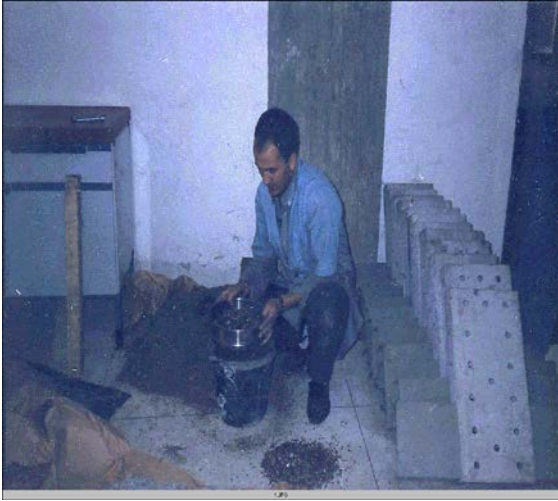
Afin de compléter cette étude et cerner de près les lois régissant le comportement du béton à haute performance vis-à-vis des déformations différées, nous suggérons les recommandations pratiques suivantes.

1. Utilisation de ciment de grande résistance ayant une faible teneur en  $C_3A$  qui donne des résultats plus performants que le ciment CPJ45.
2. La résistance des granulats doit être suffisante pour éviter que les granulats ne se cassent lors de la fabrication des éprouvettes.

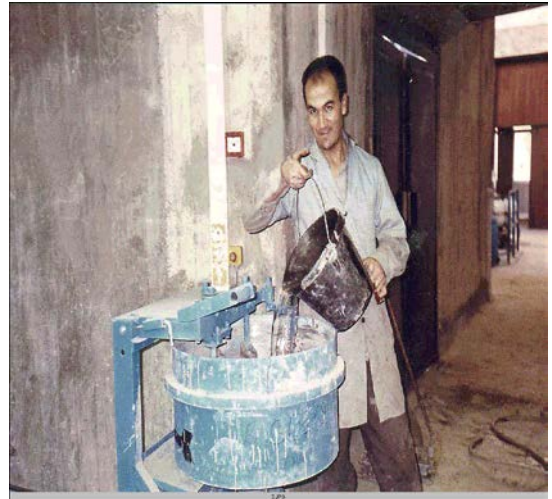
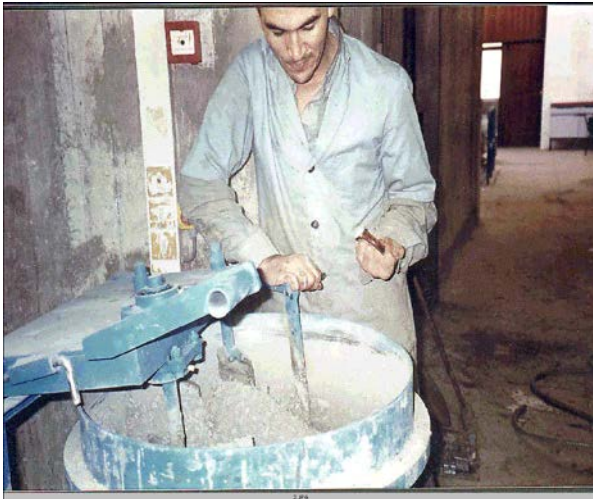
Il serait intéressant et judicieux de compléter ultérieurement notre recherche par des travaux prenant en considération les axes suivants :

1. Etude de chaque type de retrait séparément.
2. Etude des différents types de fluage d'un béton au jeune âge.
3. Etude de l'influence des granulats sur le comportement du béton vis-à-vis du retrait et du fluage.
4. Etude de l'effet de la composition chimique du ciment sur le retrait et le fluage des bétons.
5. Etude de l'effet de l'environnement, tel que la température ou l'humidité relative, sur les propriétés mécaniques et les déformations différées des BHP.
6. Etude de la résistance au feu.
7. Elaboration d'un modèle numérique qui permet l'évaluation du retrait et du fluage.
8. Etude de la durabilité des BHP à travers les essais : de corrosion, de la pénétration des agents agressifs et de la carbonation.
9. Ductilité des BHP.

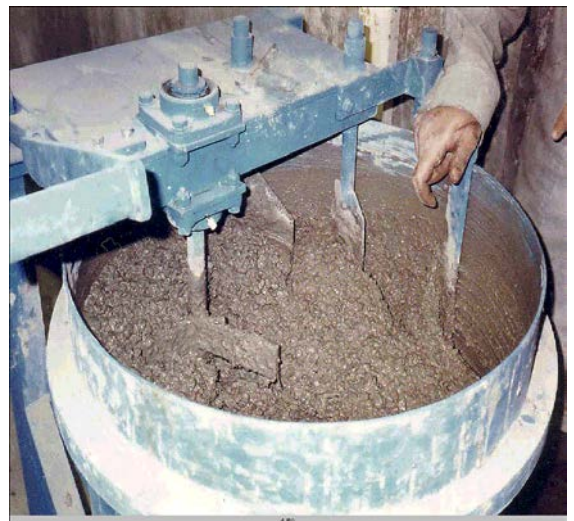
## ANNEXE 1 : PHOTOGRAPHIE

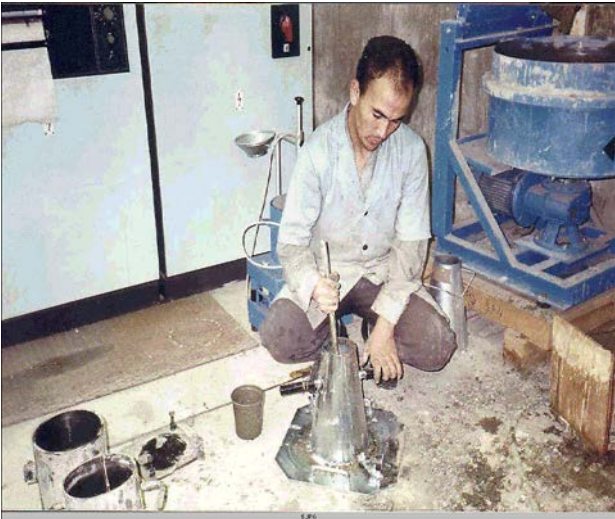


**Fig.1 :Tamisage et lavage des granulats et réalisation du coffrage**

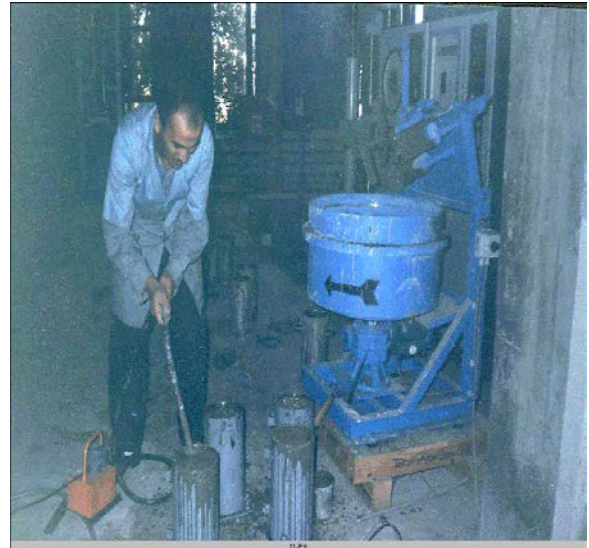
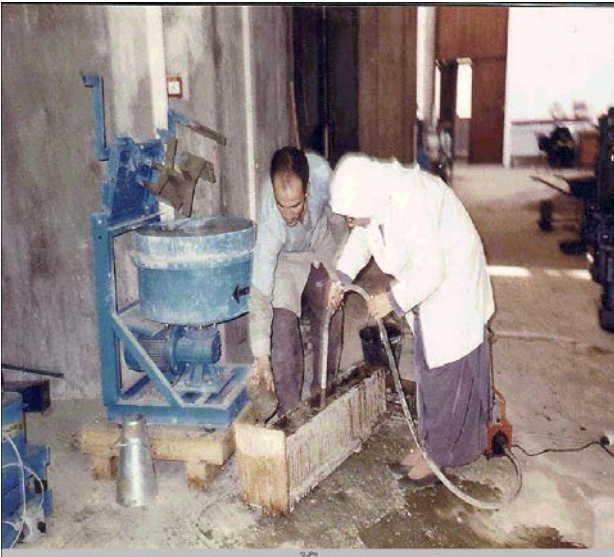


**Fig2 : L'opération de malaxage**





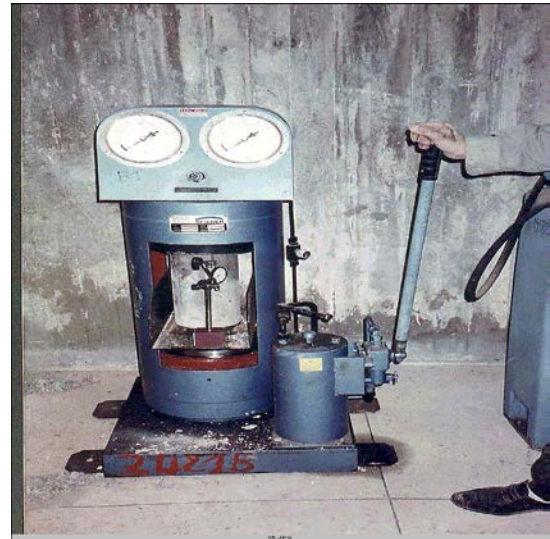
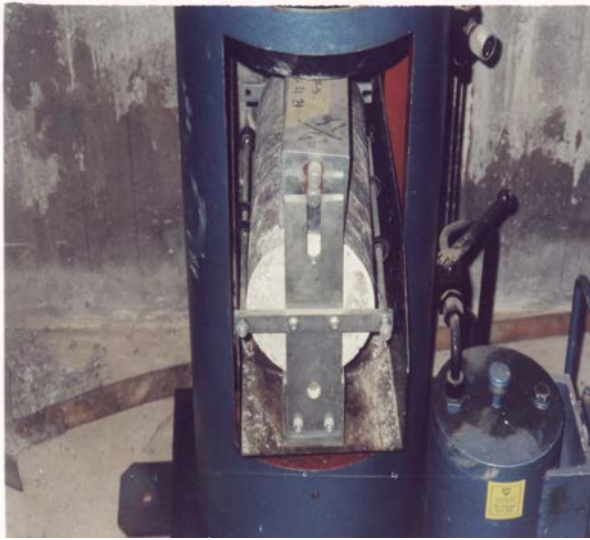
**Fig.3 : essai au cône d'ABRAMS**



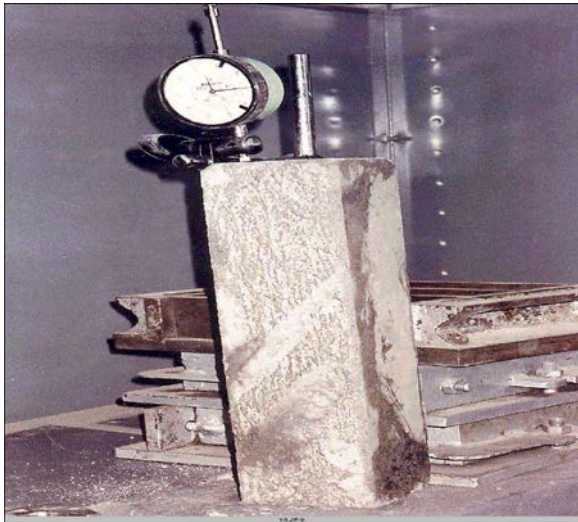
**Fig.4 : vibration des éprouvettes**



**Fig.5 : Surfaçage des éprouvette**



**Fig.6 : Essai préliminaire sur béton durci**



**Fig.7 :Retrait des éprouvette(7\*7\*28)**



**Béton armé**



**Béton à hautes performances**

**Fig.8 : Fluage et retrait des poutres.**

## ANNEXE 2

### METHODE DE BARON LESAGE : *Optimisation du squelette granulaire*

#### **I- objet de la méthode**

- Déterminer les proportions relatives des constituants telles qu'après mise en place le béton soit homogène et sa porosité soit minimale.
- Définir les tolérances admissibles sur les dosages des constituants et, surtout, sur le dosage de l'eau, de telle sorte que le béton soit suffisamment maniable et ne contienne pas trop d'eau.

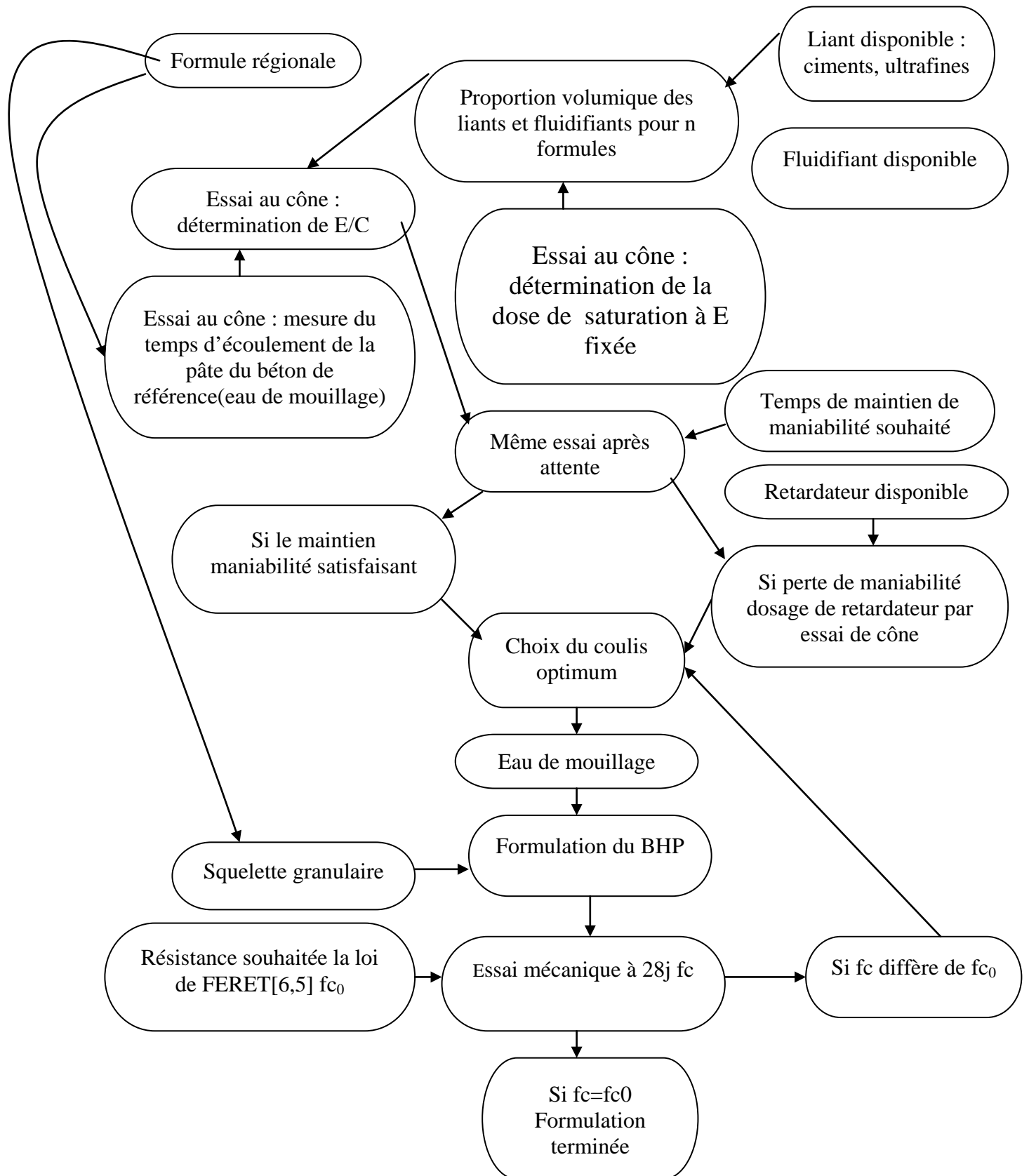
#### **II- principe de la méthode :**

- Déterminer par approximation successive l'ensemble des proportions relatives des constituants solides inertes pour lesquels, à dosage en ciment et en eau fixée, le béton s'écoule le plus rapidement dans le maniabilimètre LCL(détermination de squelette optimal).
- Déterminer le dosage en eau nécessaire pour que le béton à squelette optimal s'écoule en un temps donné dans le maniabilimètre LCL

Les différentes étapes de la méthode peuvent se résumer comme suit :

- Une composition arbitraire le rapport E/C et un volume de pâte sont fixés(découlant généralement d'une première composition déterminée par une méthode empirique du type DREUX ou FAURY[1,5,7].
- Ces paramètres étant constants(E et C), on optimise le squelette en cherchant le rapport sable/granulat qui donne la meilleure maniabilité, et cela par la confection de plusieurs gâchées.
- Tracer la courbe selon le mélange granulaire :
  - Dans le cas d'un béton à deux granulats :  $X_1=S/G$
  - Dans le cas d'un béton à trois granulats :  $X=S/(g+G)$ ,  $Y=g/G$ .  
La valeur de Y est fixée à priori, pour des raisons diverses :
    - Equilibre des stocks, coût des matériaux.
    - Possibilité des dosages de la centrale.

### ANNEXE 3 ORGANIGRAMME RESUMANT LA METHODE DE COMPOSITION DE BHP[6,5]



### ANNEXE 3

## RAPPEL DES FORMULATIONS DES BETONS A HAUTES PERFORMANCES

**Méthode d'ERNSTROY et SHACKLOCK(elle date des années cinquante) :** Elle ne prévoit pas l'utilisation de fluidifiants et d'ajouts submicroniques dans les BHP. Elle vise la compacité du béton et préconise l'utilisation des moyens de serrage habituels du béton pour les BHP.

**Méthode de l'Institut américain du béton(1984) :** elle vise essentiellement comme performance du béton, sa résistance en compression simple à 28 jours à laquelle on lie les autres caractéristiques telles que la durabilité, la résistance à la traction par flexion ou par fendage. Elle vise aussi un affaissement donné pour un béton d'application donnée (100mm en général)

La méthode ACI de conception BHP dans cet état ne peut donc pas permettre d'optimiser la composition de ces Bétons pour un usage donné.

**Méthode de formulation des BHP de DE LARRARD(1988) :** Elle se fonde sur la méthode LPC de composition des bétons ordinaires sur la loi de FERET généralisée, et sur le modèle de viscosité de FARRIS pour déterminer la composition des BHP[9,6].

La méthode de LPC et la loi de FERET SONT des outils qui ont fait leur preuve pour la composition des bétons traditionnels.

Dans tous les BHP, pour un affaissement et une résistance avec la substitution d'une partie du ciment par des ajouts submicroniques et l'utilisation de fluidifiants, on peut avoir toute une gamme de bétons de compositions très différentes. Ce qui rend inutilisable la méthode de LPC pour optimiser la composition des BHP du seul point de vu résistance[6,9].

La tendance actuelle, étant à la formulation de BHP très fluides, le maniabilimètre LCL ne serait plus apte à mesurer le temps d'écoulement inférieur à 2 s.

**La méthode de PEDECHES(1988) :** cette méthode est basée sur celle des compositions des bétons traditionnels de DREUX-GORISSE.

Elle utilise un dosage de 10% en fumée de silice et des gros granulats de dimension maximale de 10mm.

Elle a mis en évidence un dosage optimum de liant entre 350 et 500 kg

Cependant, compte tenu de la limitation du diamètre maximale des granulats(à10mm), et de leurs caractéristiques bien déterminées, il est nécessaire pour élargir son utilisation, de l'étendre à des granulats divers et de diamètre maximal autre.

## ANEXE 4

### FORMULATIONS INTERNATIONALES

On va exposer dans cette partie quelques formulations françaises utilisées dans différentes régions pour les compositions des BHP.

- A. BHP lyonnais : la composition du béton a été déterminée par la méthode de FAURY. Toutefois, une optimisation des rapports gravillon/gravier et gravier+gravillon/sable à été réalisé par la méthode LCL. Ils ont adopté la formulation suivante :
- gravier 12.5/20 (silico-calcaire)-----852kg.  
 gravillon 5/12.5 (silico-calcaire)-----267kg.  
 sable 0/5 (silico-calcaire)-----765kg.  
 CPA HPR de VAL D'AZERGUES(ciment lafarge) avec une faible teneur en C<sub>3</sub>A--  
 425kg. eau-----  
 ---150l. durciplast(1.5% du poids de ciment)-----  
 6.375kg. Crytart(0.4% du poids de ciment)-----  
 ----1.7kg. Rapport E/C-----  
 -----0.353. Les résultats des slumps

Temps (mn)	0	30	60
Slumps (cm)	25	25	18

Le contrôle des résistances mécaniques a été effectué sur cylindres(16\*32)

Echéances(jours)	1	7	28	90
Résistance(MPa)	17.8	60.8	74	82.8
Fendage			5.3	

- B. BHP niçois : la méthode de FAURY a été adaptée pour la composition théorique des bétons, comme ils ont utilisé le sable roulé concassé du VAR, qui contient beaucoup de fines
- gravier calcaire SPADA 10/20-----698kg  
 gravillon calcaire SPADA 6/14-----465kg  
 sable du VAR-----738kg  
 CPA HPR(CONTES)-----425kg  
 eau-----160l  
 durciplast(2%)-----8.5kg  
 Chrytard(0.4%)-----1.7kg  
 E/C-----0.376

Temps (mn)	0	30	60
Slumps(cm)	19	19	11

Les essais d'écrasement ont été faits sur des éprouvettes 16\*32

Echéances(jours)	1	2	7	28	90
Compression	37.1	51.3	69.5	76.1	87.3

- C. BHP toulousain : la composition théorique est faite selon FAURY.

Gravier de GARONNE 10/20-----875kg  
 graviers de GARONNE 6/20-----137kg

sables roulés de GARONNE 0/2-----700kg  
 CPA HP-----425kg  
 Eau-----150l  
 Durciplast(2%)-----8.5kg  
 Chrytard(0.4%)-----1.7kg

les résistances obtenues sont les suivant :

Echéances(jours)	7	28
Compression(MPa)	55.1	6.3

D. Formulations nationales : plusieurs investigations ont été faites sur le territoire national, en commençant par les essais réalisés au CNERIB par le département des matériaux, et qui ont abouti à des résultats satisfaisants. Cependant, ils n'ont pas dépasser le seuil des 60 MPa à cause de la qualité médiocre des matériaux utilisés. D'autres recherches ont été entamées sous la direction de M. BALI<sup>23</sup> et M<sup>mes</sup> KATTAB et BAUCHE<sup>16</sup>, ils ont même dépasser le stade de formulation pour étudier les différentes caractéristiques des BHP. D'autres universités ont investi sur ce matériau, notamment à CHLEF sous la direction de M. CHEMROUK<sup>5</sup>, à BLIDA<sup>36</sup>, à TELEMENECEN etc.

Au sein de de l'USTHB, M<sup>me</sup> KHERCHI<sup>44,45</sup> est l'initiatrice des recherches sur la formulation des BHP, elle a même obtenu des résultats encourageante avec le peu de moyen dont l'institut dispose, malheureusement cette démarche n'a pas été soutenue par la suite.

Malheureusement, jusqu'à maintenant on n'a pas encore une formulation unique pour chaque région à cause de la diversité des matériaux ainsi la non-stabilité des qualités des matériaux de la même société.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] F. GORISSE(1978) : « Essai et contrôle des bétons », Edition Eyroles, CETP.
- [2] B. DOMINIQUE BOY(1989) : « Les Bétons à Hautes Performances », LCPC, Paris
- [3] ACI COMMITTEE (1992) «State-of- the- art report on high strength concrete», ACI 363-92. PP1-53.
- [4] H. KHELAFI(1994) : « les bétons de hautes performances, béton aux fumées de Silice », Algérie équipement (janvier)
- [5] HAMRAT(1996) : « les bétons à hautes performances », mémoire de Magister, Université de Chlef.
- [6] F. DE LARRARD, (1988) : «formulation et propriétés des bétons à très haute Performance», Thèse d'état, LCPC, Paris.
- [7] P. A. GUTUEREZ et F. GANOVAS (1996) : «high performance concrete : requirement for constituents materials and mix proportioning».ACI Journal n°93 M26 (May-june). PP 233-241
- [8] S. IRAVANI (1996) : «properties of high performance concrete», ACI Material journal n°93 M47. PP416-426
- [9] Y. DIATA(1987) : «corrélation entre lois le module d'élasticité, le module de rupture, le coefficient de Poisson et la résistance en compression simple de BTHR (60-120MPa)», Mémoire de maîtrise sciences appliquées spécialité : génie civil, Sherbrooke, Québec, Canada
- [10] BULLETIN DES LCPC (Mai1996) : « Extension du domaine d'application des règlements de calcul BPEL\BAEL aux bétons à 80 MPa », Spécial IX, LCPC, Paris. PP 7-91
- [11] I. GUENOT-DELAHAIE, (Avril1997) : « contribution à l'analyse physique et modélisation de fluage propre du béton», OA 25, LCPC, Paris.
- [12] R. LE ROY, (1996) : « déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances », L.C.P.C, Paris.

- [13] A. BOUZIDI, (1994) : « élaboration d'un béton à hautes performances à partir des matériaux locaux » Algérie équipement n°16 (janvier).
- [14] L. BOUBAKIR. «Elaboration et étude d'un béton à haute performance». Mémoire de magistère, ENP, 1999.
- [15] C. GAUCHER, (1984) : « tentative de caractérisation du comportement rhéologique non linéaire dans la représentation par intégrale multiple », rapport de recherche LPC N°108, LCPC, Paris.
- [16] A. GHRIEB et H. IKLEF »influence du béton sur le comportement des poutres en flexion » Mémoire P.F.E 1999, ENP.
- [17] G. DREUX «Nouveau guide du béton », édition Eyrolles 1995 ENSET, France.
- [18] S. J. FOSTER(1996) : «Perfrmance of high straingth concrete », ACI Journal n°93 s52 (September-October). PP 555-563
- [19] V. BAROGHEL-BOUNY (1998) «étude comparative de la durabilité des bétons B30 et B80»1998 LCPC. Paris.
- [20] Y. MALIER.(1992) «Les bétons à hautes performances», 1992 Ecole française du béton PP 25-94.
- [21] M. CHEMROUK et M. HAMRAT, (2001), «high performance concrete experimental studies of the material ». Communication acceptée pour être présentée à l'univesité de Dindé.
- [22] M. CHEMROUK, (2000) : «béton à haute performance : choix des constituants du mélange pour produire un matériau hautement performant », USTHB, Alger.
- [23] A. LOGBI, (1999) : «effet de l'incorporation des ajouts minéraux sur les propriétés physico-mécaniques du béton », ENP.
- [24] S. J. FOSTER et R. I. GILBERT, (1996) : «the design of nonflexural with normal and high strength concrete», ACI Structural Journal, (January–February).
- [25] M. AUPEIN, P. RICHARD, F. DE LARRARD et P. ACKER, (1989) : «retrait et fluage de bétons à hautes performances ; influence de l'âge au chargement», LCPC, Paris

- [26] T. H. WEE, M. S. CHIN et M. A. MANSUR, (1996) : «stress-strain relationship of high strength concrete in compression», *Journal of Materials in civil engineering* (May).
- [27] K.F.SARSAM et J.M.S.AL MUSAWI, (1992) : «Shear design of high and normal strength concrete beams with web reinforcement», *ACI Structural Journal* n°89 S62 (November-December). PP658-664.
- [28] S. SARKAR, O. ADWAN et J. G. L. MUNDAY, (1996) : «high strength concrete : an investigation of the flexural behaviour of high strength RC beams», University of ABERTAY, Dundee.
- [29] L.GRANGER et R. LE ROY, (1995) : «problème des déformations différées du béton précontraint et du béton armé ; fluage combiné du couple acier-béton», PP 13-18, L.C.P.C ; paris
- [30] V. WALLER, P. NAPROUX et F.DE LARRARD, (1997) : «contribution des fumées de silice et des cendres volantes silico alumineuses à la résistance en compression du béton ; quantification», LCPC
- [31] N. A. LLOYD, B.RANGAN et J.G.MAC REGOR, (1996) : «Studies on high strength concrete columns under eccentric compression», *ACI Structural Journal* n°93 S59 (November-December). PP 631-638.
- [32] S. A. ASHOUR et F. F. Wafa, (1993) : «flexural behavior of high strength concrete», *ACI structural journal* n°90 S29 (May-June). PP 279-286.
- [33] H. H. H. IBRAHIM et J. G. MAC GREGOR, (1996) : «test of eccentrically loaded high strength concrete columns», *ACI Structural journal*, N°90 S55 (May-June). PP 585-594.
- [34] R. DUPIN, R. LANCHON et J. C. SAINT ARROMAIN, (1995): *Granulats, sols, ciment et béton : caractérisation des matériaux*», MST Génie Civil. Edition CASTILA.
- [35] R. LE ROY, F. DE LARRARD, G. PONS (1995): «Calcul des déformations instantanées et différées des BHP», *Bulletin des LCPC Spécial XIX*, PP 63-84
- [36] O. BOUKSANI, (2000) : «Les à hautes performances aux fumées de silices », Thèse de magister, université de Blida.

- [37] P C AITCIN, (1990) : « le développement des bétons à hautes performances en Amérique du Nord » les BHP Presse de L'ENPC Y. MALIER
- [38] F. DE LARRARD et Y. MALIER, (1989) «propriétés constructives des bétons à très hautes performances » Annale ITBTP n° 479. Dec 1989. PP 77-108,
- [39] M. BUIL et J.P. OLIVIER, (1992) : « conception des bétons : la structure Poreuse » la durabilité des bétons, presse L'ENPC olivier, France.
- [40] J. SERCOMBE, (1988) : «modélisation du comportement du béton en dynamique rapide ». LCPC.
- [41] CHANGYUE HUA, (1995) : « Analyse et modélisation du retrait d'autodessiccation de la pâte de ciment durcissante », LCPC
- [42] CHANG HU, (1995) : « Rhéologie des bétons fluide ». ACI journal
- [43] Y. DIATA, (1990) : « Lois de composition des bétons à haute performance », Thèse de DEA, INSA, Toulouse.
- [44] F. KHERCHI (1996) : « A la recherche d'un béton A hautes performances Algérien », Revu de l'ENTP, Alger.
- [45] F. KHERCHI (1996) : « Etude expérimentale béton A hautes performances(BHP)- formulation et recherche d'un modèle de rupture », First ARAB MECHANICS CONGRESS, Damascus, Syria
- [46] M.N. OUDJIT (1986) : « réactivité des fumées de silice condensées en présence de la chaux ou de ciment portland » Thèse docteur-ingénieur, INSA de Toulouse