

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE CONSTANTINE 1

Faculté des Sciences de la Technologie

Département : Génie Civil



N° d'ordre :
Série :

Mémoire
Présenté pour obtenir le diplôme de
Magister en Génie Civil
Option : Matériaux de construction

**Contribution à la modélisation du retrait des
bétons**
"Application au béton Autoplaçant "

**Présentée par :
BOUDRA SARA**

Devant le Jury composé de :

Président : A. BELOUAR, Prof. Université de Constantine 01

Rapporteur : R. LASSOUED, Prof. Université de Constantine 01

Co-Encadreur : S. BENSEBTI, Mc. Université de Constantine 01

Examineurs : Mme. BENTALHA Malika, Mc. Université de Constantine 01

K. ABDOU, Mc. Université de Constantine 01

Octobre 2014

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes directeurs de thèse. Monsieur RACHID LASSOUED, pour son soutien, encouragement et compréhension dans les moments difficiles de la thèse. Je le remercie chaleureusement pour tous ses efforts ainsi que son dévouement dans le suivi de ce travail. Sa grande disponibilité m'a été très bénéfique. Je tiens à témoigner de leur professionnalisme ainsi que de sa grande générosité scientifique et humaine.

Un grand merci aussi à Mon Co-encadreur SALAH EDDINE BENSEBTI, pour le temps qu'il m'a consacré, pour sa collaboration et pour avoir suivi les travaux expérimentaux de cette thèse.

Je voudrais exprimer ma gratitude pour toute l'aide apportée, envers Monsieur, **A.CHABANE.**

Je voudrai faire des remerciements particuliers au :

Monsieur, A.BELOUAR,

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury, pour tous les conseils qu'il m'a souvent prodigué et pour la rigueur respectueuse qu'il a toujours représenté.

Madame, M.BENTELHA,

Monsieur, K.ABDOU,

De m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner et de critiquer mon travail.

Je voudrais manifester mes remerciements aux personnels enseignants-chercheurs, administratifs et techniques du LMDC plus particulièrement Chaib Sihem.

Je suis très reconnaissante à mes collègues, Boukezzoula Amira, Reziouk Amina et pour leur aide et leur disponibilité, pendant toute la durée du travail expérimental et même après.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude à toute ma famille pour son soutien indéfectible durant les années de thèse.

RESUME

RESUME:

Le béton autoplaçant « BAP » est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration, il est développé depuis une vingtaine d'années, mais il est encore à l'heure actuelle qualifié de «nouveaux bétons»

Le présent travail mené au sein de l'équipe ingénierie des matériaux du laboratoire matériaux et durabilité des constructions LMDC de l'université Constantine 1, est une recherche sur l'influence des paramètres de composition sur le comportement des bétons autoplaçants (BAP) à l'état frais et durci et les paramètres de composition et de conservation sur le comportement différé (retrait).

Le retrait est l'un des paramètres majeurs responsables de fissuration des bétons. En effet, la composition des BAP avec un volume de pâte supérieur à celui des bétons ordinaires induit un retrait plus grand et augmente leur sensibilité à la fissuration. L'incorporation de fillers calcaires disponibles en quantité et à moindre coût dans notre région de Constantine en tant qu'addition minérale dans les bétons autoplaçants (BAP) constitue une voie de valorisation écologique et économique.

Le but était de bâtir un programme à double objectif. Le premier est purement expérimental, le second est de comparer la déformation de retrait observée avec six modèles réglementaire de prévision de retrait et de déterminer quel modèle prédit le plus précisément le retrait du BAP.

Mots clés :

Béton autoplaçant – Matériaux locaux –Filler calcaire-Retrait-modèle de prédiction.

ABSTRACT:

Self-compacting concrete (SCC) is a fluid concrete, highly deformable, uniform and stable which is taking place by gravity and without the requirement of a means of vibration, it is developed over the last twenty years, and it is still currently called "new concrete"

This work led to the team materials and engineering laboratory materials and sustainability in construction LMDC University of Constantine 1, it is a research on the influence of composition parameters on the behavior of self-compacting concrete (SCC) in fresh and hardened state and composition parameters and conservation deferred behavior (shrinkage)

Shrinkage is one of the major parameters responsible for cracking of concrete. Indeed, the composition with a volume of BAP pulp higher than ordinary concrete induces greater shrinkage and increases their susceptibility to cracking. The incorporation of fine natural available in quantity and cost in our region of Constantine as an addition mineral in self-compacting concrete (SCC) is a way of ecological and economic recovery.

The aim was to build a program two fold. The first is purely experimental, the second is to compare the shrinkage deformation observed with six r models for predicting shrinkage and determine which model more accurately predicted the removal of the BAP.

Keywords:

Self compacting concrete - Materials local- limestone- shrinkage-prediction model.

الخلاصة:

الخرسانة ذاتية الموضع هي خرسانة لها القدرة على السيولة، التشوه، موحدة ومستقرة وترص نفسها تحت تأثير الجاذبية و دون الحاجة الى متطلبات الاهتزاز، تأخذ تماما شكل القالب الذي توضع فيه مهم كان معقدا. تم اكتشاف هذه الخرسانة منذ عشرين سنة لكنها لا تزال في الوقت الحاضر تعتبر " خرسانة جديدة ".
حققنا هذا العمل على مستوى مخبر هندسة المواد و فريق الاستدامة في البناء (LMDC) جامعة قسنطينة 1. العمل هو بحث حول تأثير عوامل تكوين الخرسانة على سلوكها في الحالة السائلة و الصلبة و عوامل تكوين الخرسانة و حفظها على السلوك المؤجل (الانكماش).

الانكماش من بين الأسباب الرئيسية المسؤولة عن تكسير الخرسانة، خاصة و إن الخرسانة ذاتية الموضع تحوي حجما أكثر من الاسمنت مقارنة بالخرسانة العادية الذي يجعلها ذات انكماش أكبر ويزيد من قابليتها للتشقق . إدراج الحشو الحجر الجيري المتوفر بالكمية و التكلفة في منطقتنا قسنطينة باعتباره وسيلة لاسترداد البيئية و المحافظة عليها.
الهدف هو بناء البرنامج من جزئين الأول هو تجريبي بحث ، والثاني هو مقارنة تشوه انكماش مع ستة نماذج التنظيمية للتنبؤ انكماش و تحديد النموذج الذي ينبأ بدقة أكبر.

الكلمات المفتاحية:

الخرسانة ذاتية الموضع – مواد محلية- الحجر الجيري- انكماش - نموذج التنبؤ.

NOTATIONS

Glossaire:

Notations cimentaires pour l'ensemble du document:

A : Al_2O_3	C : CaO	S : SiO_2
F : Fe_2O_3	$\bar{\text{C}}$: CO_2	$\bar{\text{S}}$: SO_3
H : H_2O	M : MgO	K : K_2O
T : TiO_2	P : P_2O_5	N : Na_2O

Notation et Abréviation :

AFGC : Association Française de Génie Civil
BAP : Béton autoplaçant
BAP : Bétons autoplaçants
BO : Béton ordinaire
C₂S : Silicate bicalcique
C₃A : Aluminate tricalcique
C₃S : Silicate tricalcique
Ca(OH)₂ : Portlandite
CaCO₃ : Carbonate de Calcium ou Calcaire
CaO : Chaux libre
CO₂ : Dioxyde de Carbone
C-S-H : Silicate de Calcium hydraté
E : Module d'élasticité
E/C : Rapport massique Eau sur Ciment
E/L : Rapport massique Eau sur Liant (Ciment + additions minérales)
FC : Fillers Calcaires
G : Gravillon
G/S : Rapport gravillons / sable.
M_v : Masse volumique (kg/m ³)
R_c : Résistance à la compression.
R_{c28j} : Résistance mécanique à 28 jours
S : Sable.

SP : Superplastifiant
T : Température
t : Temps
t₀ : Instant juste après la gâché
T500 : Temps à 500 mm d'étalement
t_v : Temps d'écoulement au V-Funnel
Vpâte : Volume absolu de la pâte du béton
π : Indice de stabilité au tamis (%)
ρ : Masse volumique (kg/m ³)

Expression mathématiques :

(t - t_c) : Durée de séchage (jours),
(V/S)₀ : Est égal à 50mm.
(t - t_c) : Durée de séchage (jours).
f_{cm0} : Résistance moyenne du béton à 28 jours
f_{cm28} : Résistance caractéristique du béton à 28 jours,
α_{as} : Coefficient qui dépend du type de ciment
α_{ds1} et α_{ds2} : Coefficients qui dépend du type de ciment
β_{RH}(h) : Coefficient prenant en compte les conditions de conservations du retrait (l'effet d'humidité relative);
β_{RH,T} : Facteur d'humidité relative corrigée par la température
β_{SC} : Coefficient tenant compte du type de ciment sur le retrait ultime
β_{ds}(t - t_c) : Fonction qui décrit le développement du retrait de dessiccation avec le temps
β_s(t - t_c) : Coefficient qui décrit le développement du retrait en fonction du temps de séchage
β_{s,T}(t - t_c) : Coefficient dépendant de la température
β_{sl} : Coefficient qui prend en compte l'auto-dessiccation au béton à haute performance
γ_{sh,RH} : Facteur de correction tenant compte de l'effet de l'humidité relative.
γ_{sh,t_c} : Facteur de correction tenant compte de l'effet de la durée de la cure.
γ_{sh,vs}, γ_{sh,s}, γ_{sh,ψ}, γ_{sh,c}, γ_{sh,α} : Facteurs de correction liés à la composition du béton,
ε_{cas}(t) : Le retrait endogène ;

$\epsilon_{cas0}(f_{cm28})$: Coefficient fictif de retrait endogène
$\epsilon_{cds}(t, t_c)$: Le retrait de dessiccation
$\epsilon_{cds0}(f_{cm28})$: Coefficient fictif de retrait de dessiccation
$\epsilon_{s\infty}$: Déformation de retrait au temps t,
$\epsilon_{sh}(t, t_c)$: Déformation dépendant du temps "t" de retrait,
$\epsilon_{sh}(t, t_c)$: Le retrait total ;
$\epsilon_{sh}(t, t_c)$: Le retrait total;
$\epsilon_{sh\infty}$: Déformation de retrait ultime (10^{-6}),
ϵ_{shu} : Le retrait ultime du béton,
A_c : Aire de la section du béton,
D : Epaisseur effective de la section transversale de l'élément de béton
$E(7+600) = E(607)$: La valeur de la raideur élastique à 607 jours,
h : Taux d'humidité relative ambiante en décimale
h_0 :le rayon moyen de la section
h_0 : est égal à 1
k_h : Facteur tenant compte de l'effet de l'humidité relative sur le retrait,
k_h : Coefficient dépendant du rayon moyen h_0 ,
K_s : Facteur tenant compte de la forme de la section transversale
RH : L'humidité relative ambiante (%),
RH_0 : L'humidité relative ambiante de référence
$S(t, t_0)$: Fonction décrivant l'évolution du retrait avec le temps,
t : Age du béton (jours),
t_c : Age du béton au début du retrait (jours),
t : Age du béton (jours) à l'instant considéré ;
T : La température ambiante ($^{\circ}C$) ;
t_0 : L'âge du béton au début de séchage (jours),
T_0 : Est égale à $1 C^{\circ}$.
t_1 : est égal à 1 jour;
t_c : Age du béton au début de séchage (jours) ;
u : Périmètre de la partie de la section exposée à la dessiccation.
V/S : Le rapport (volume/surface) (mm) ;
w : La teneur en eau (Kg/m^3)
α_1 : Qualifie le type de ciment,
α_2 : Qualifie le mode de cure du béton,
$\beta_{ds}(t, t_s)$: Une fonction qui traduit l'évolution dans le temps du retrait de séchage

ϵ_{ca} : La déformation due au retrait endogène.
ϵ_{cd} : La déformation due au retrait de séchage
ϵ_{cs} : La déformation totale de retrait
$\epsilon_{sh\infty}$: Déformation de retrait ultime (10^{-6}),
τ_{sh} : Temps mis pour atteindre la moitié du retrait (jours),

SOMMAIRE

SOMMAIRE

REMERCIEMENT

RESUME

ABSTRACT

خلاصة

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURE

INTRODUCTION GENERALE.....1

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I-1 :LE BETON AUTOPLAÇANTS, "CONCEPT ET FORMULATION"

I-1-1 Historique:	7
I-1-2 Définition:.....	9
I-1-3 Matières premières utilisées dans les bétons autoplaçants:	10
I-1-3-1 Granulats :	10
I-1-3-2 les additions minérales:.....	10
I-1-3-3 Ciment :.....	11
I-1-3-4 Superplastifiants :.....	11
I-1-3-5 L'agent colloïdal ou de viscosité :	12
I-1-3-6 Eau:	12
I-1-4 Spécificité de la composition d'un béton autoplaçant:	12
I-1-4-1 Grande proportion en fines:	12
I-1-4-2 Volume de pâte important:.....	13
I-1-4-3 Ajouts de super plastifiant et de rétenteurs d'eau (agent de viscosité):	13
I-1-4-4 Faible volume en gravillons:.....	14
I-1-5 Méthode de formulation de béton:.....	14
I-1-5-1 Méthode Japonaise : Méthode basée sur l'optimisation du mortier:.....	15
a) Dosage des gravillons.....	15
b) Dosage du sable	15
c) Dosage du liant.....	15
d) Dosage de l'eau et du super plastifiant	15
I-1-5-2 Méthode Suédoise:.....	16
I-1-5-3 Méthode Française :	16
I-1-6 Influence des paramètres de formulation sur les propriétés a l'état frais:.....	17

SOMMAIRE

I-1-6-1 Rôle des adjuvants:	17
a) Utilisation de superplastifiants:	17
b) L'utilisation d'agent de cohésion:	17
I-1-6-2 Rôle des fines:	17
I-1-6-3 Autre paramètres de formulation:	17
a) Volume de pâte élevé	17
b) Volume de gravillons	18
I-1-7 Essai de caractérisation des BAP à l'état frais:	18
I-1-7-1 Essai d'étalement: [NF EN 12350-8]:	18
a) Mesure de l'étalement	18
b) Mesure de la vitesse d'étalement	19
I-1-7-2 Essai de V (V funnel): [NF EN 12350-9]	19
I-1-7-3 Essai de la boîte en L: [NF EN 12350-10]	20
I-1-7-4 Essai de stabilité aux tamis [NF EN 12350-11]:	20
I-1-8 Essai complémentaires sur béton frais:	21
I-1-8-1 Mesure de la teneur en air occlus [NF EN 12350-7]:	21
I-1-8-2 La masse volumique [NF EN 12350-6]:	22
I-1-9 Essai de caractérisation des BAP a l'état durci:	23
I-1-9-1 Résistance mécanique à la compression: [NF EN 196-1]	23
I-1-9-2 Module d'élasticité en compression:	23
I-1-9-3 Résistance mécanique à la traction:	23
I-1-10 LES FILLERS CALCAIRES	23
I-1-10-1 Introduction:	23
I-1-10-2 Définition :	24
I-1-10-3 Avantages:	24
a) Avantages techniques	24
b) Avantages économiques	24
c) Avantages écologiques :	24
I-1-10-4 Influence des fillers calcaires sur les propriétés des bétons:	25
a) Information de la littérature	25
b) Influence du filler sur l'état frais	25
c) Influence du filler sur résistance mécanique	25
 CHAPITRE I-2 : LA PATE DE CIMENT, UNE STRUCTURE POREUSE	
I-2-1 Introduction:	25
I-2-2 La microstructure du béton:	25

SOMMAIRE

I-2-2-1 La pâte de ciment durci :	25
I-2-2-2 Les granulats:	25
I-2-2-3 L'interface pâte de ciment/granulat:	26
I-2-3 Généralités sur le ciment :	26
I-2-3-1 Fabrication du ciment:	26
I-2-3-2 La composition chimique et minéralogique:	27
I-2-3-3 Processus d'hydratation du ciment et son mécanisme:	28
a) Mécanisme d'hydratation.....	28
b) Les produits d'hydratation	29
I-2-3-4 Les pores dans la pâte de ciment:.....	31
a) pores capillaires.....	32
b) pores des hydrates	32
I-2-3-5 L'eau dans la pâte de ciment durcie:.....	33
a) L'eau chimiquement liée ou eau de constitution.....	33
b) L'eau physiquement liée ou eau adsorbée:	33
c) L'eau de capillarité ou eau libre.....	33

CHAPITRE I-3 : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE "RETRAIT ET FLUAGE"

I-3-1 Introduction:	34
I-3-2 Retrait:	35
I-3-2-1 Historique:.....	35
I-3-2-2 Définition:	35
I-3-2-3 Les types de retrait:	36
a) Variations volumiques dues à l'hydratation "retrait endogène":.....	36
i) La contraction Le Chatelier.....	37
ii) Le retrait thermique.....	37
iii) Mécanismes du retrait endogène.....	37
iv) Facteurs influençant le retrait endogène:	39
• Rapport E/C:	39
• Composition et finesse du ciment:.....	39
• Dosage du ciment:	40
• Adjuvant:	40
• Granulats:.....	40
• Dimensions de l'élément de béton (effet d'échelle):	41

SOMMAIRE

b) Variations volumiques dues à de l'exposition aux conditions extérieures:.....	41
i) Le retrait plastique :	41
ii) Le retrait de dessiccation:	42
iii) Retrait de carbonatation :	44
iv) Facteurs influençant retrait de dessiccation:	44
• Rapport (E/C) et la teneur en granulats:	44
• Rapport (G/S) et le type de granulat:	46
• L'humidité relative:	46
• Période de cure:	47
I-3-3 Fluage:	47
I-3-3-1 Historique.....	47
I-3-3-2 Définition:	47
I-3-3-3 Types de fluage:	48
a) Fluage propre:	48
b) Fluage de dessiccation:	49
c) Mécanismes du fluage:	49
I-3-3-4 Facteurs influençant le fluage:	49
• Age du béton au moment de la mise en charge:	49
• Rapport E/C:	50
• Dosage et type de ciment :	50
• Adjuvant:	51
• Granulats:.....	51
• Température:.....	52
• Humidité ambiante:	53
I-3-3-5 Les types d'essais mécaniques du fluage:.....	53
a) Fluage en traction:	53
b) Fluage en compression:.....	54
c) Fluage en flexion:.....	54
i) Dispositif d'EDOUARD :	54
ii) Dispositif de CHABANE:.....	54

CHAPITRE I-4: ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

I-4-1 Introduction.....	56
I-4-2 Les modèles de prédiction.....	57

SOMMAIRE

I-4-2-1 Les modèles Européens.....	57
a) CEB MC-90.....	57
i) Limites d'application du modèle.....	57
ii) Les paramètres requis.....	57
iii) Calcul du retrait.....	58
b) CEB MC 90-99:.....	60
i) Limites d'application du modèle.....	61
ii) Les paramètres requis.....	61
iii) Le calcul du retrait.....	61
c) Le modèle de l'Eurocode 2:.....	64
i) Limites d'application du modèle.....	65
ii) Les paramètres requis.....	65
iii) Calcul du retrait.....	65
I-4-2-2 Les modèle Américains:.....	71
a) Le modèle B3:.....	71
i) Les limites d'application du modèle.....	71
ii) Les Paramètres requis.....	71
iii) Calcul de retrait.....	71
b) Le modèle ACI 209R-92 :.....	75
i) Les paramètres requis.....	75
ii) Calcul du retrait.....	75
c) GL 2000 Gardner-Lockman :.....	82
i) Limites d'application du modèle.....	82
ii) Paramètres requis.....	82
iii) Calcul du retrait.....	82
COCLUSION DE LA PARTIE I.....	85

PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

II-1-1 Introduction:.....	87
II-1-2 Matériaux utilisés.....	87
II-1-2-1 Ciments:.....	88
II-1-2-2 Les fillers calcaires « FC »:.....	89

SOMMAIRE

II-1-2-3 Les granulats :.....	93
a) Sable 0/4:.....	93
b)Gravier de classe (4/8) et (8/16):.....	94
II-1-2-4 Eau:	94
II-1-2-5 Adjuvant:	96
II-1-3 Propriétés étudiées :	96
II-1-4 Programme expérimental:	96
II-1-4-1 Formulation du béton :.....	99
a) Préparation de gâchée :.....	101
b)Procédure de malaxage:	102
c) Confection des éprouvettes:	103
i)Eprouvette de caractérisation :.....	103
ii) Eprouvette de retrait:.....	105
iii) Eprouvette de perte en masse:	105
d) Cure des éprouvettes prismatiques et cylindriques:	105
e) Conservation des éprouvettes :.....	106
i)Eprouvettes destinées à l'écrasement:	106
ii) Eprouvettes destinés aux mesures de retrait et de perte en masse:	106
II-1-4-3 Les essais de caractérisation:	107
a) Etat frais:	107
b) Etat durci:	108
i) Résistance mécanique à la compression:	109
ii) Résistance mécanique à la traction par flexion:.....	109
II-1-4-4Mesure de retrait:	111
a) Objectif de l'essai:.....	111
b) Protocole expérimental :	111
c) Principe de l'essai:	111
d) Equipement nécessaire:.....	111
e) Conduite de l'essai:	112
f)Procédure expérimentale:	113
g)Méthodologie d'essai :	115
II-1-4-5Mesure de la perte en poids:	116

CHAPITRE II-2 : II-2 RESULTAS EXPERIMANTAUX

II-2-1 Introduction:	118
----------------------------	-----

SOMMAIRE

II-2-2 Essai de caractérisation:	118
II-2-2-1 Etude de béton frais:	118
a)Essai d'étalement	119
b)La boîte en L	120
c)Stabilité au tamis	121
d) V-funnel	121
e) L'air occlus	121
II-2-2-2 Etude de performance mécanique du béton durci:.....	122
a)Résistance à la compression:	123
i) Influence de l'âge:	123
ii) Influence du rapport (Fillers/Liant) :	124
iii) Influence de la finesse du filler:.....	125
b) Résistance à la traction par flexion :	126
i) Influence de l'âge:	126
ii) Influence du rapport (Fillers/Liant) :	127
iii) Influence de la finesse du filler:.....	128
II-2-3 Variation dimensionnelle et pondérale :	129
II-2-3-1 Etude paramétrique de retrait:.....	129
a)Influence du mode de conservation:.....	130
b)Influence de la teneur en filler:	133
i)Retrait total :	133
ii) Retrait endogène :	134
iii) Retrait de dessiccation :	136
iii) Gonflement :	137
c) Influence de la finesse du filler calcaire :	140
i) Retrait total :	140
ii)Retrait endogène :	141
iii) Retrait de dessiccation :	141
iv) Gonflement :	142
d) Retrait total des six bétons étudiés :	144
e)Retrait endogène des six béton étudiés.....	145
f) Retrait de dessiccation des six bétons étudiés.....	146
g) Gonflement des six bétons étudiés	147
II-2-3-2 Etude de la perte en masse:.....	148
a)mode ambiant :	148

SOMMAIRE

b) Mode couvert :	149
c) Mode dessiccation	150
a) Mode saturé :	151
II-2-3-3 Corrélation perte en masse- retrait :	152
a) Mode Ambiant	152
b) Mode couvert	152
c) Mode dessiccation	153
d) Mode saturé	154
COCLUSION DE LA PARTIE II	155

PARTIE III: APPROCHE REHLRMENTAIRE

CHAPITRE III-1: ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES AMERICAINS ET EUROPEENS

III-1-1 Introduction :	157
III-1-2 Les modèles européens:	157
III-1-2-1 Le béton 1BAP5:	158
III-1-2-2 Le béton 1BAP10	159
II-1-2-3 Le béton 1BAP20	160
II-1-2-4 Le béton 2BAP5	161
II-1-2-4 Le béton 2BAP10	162
III-1-2-6 Le béton 2BAP20	163
II-1-3 LES MODELES AMERICAINS:	165
II-1-3-1 Le béton 1BAP5	165
III-1-3-2 Le béton 1BAP10	166
III-1-3-3 Le béton 1BAP20	167
III-1-3-4 Le béton 2BAP5	168
III-1-3-5 Le 2BAP10	169
III-1-3-6 Le béton 2BAP20	170
Bilan des modèles	171

CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRE AVEC LES RESULTATS EXPERIMENTAUX

III-2-1 Introduction	176
----------------------------	-----

SOMMAIRE

III-2-2 Confrontation des résultats expérimentaux avec les modèles prédictifs	176
III-2-2-1 Le retrait total	177
III-2-2-2 Retrait endogène	179
III-2-2-3 Retrait de dessiccation	181
III-2-2-4 Gonflement	183
III-2-3 Analyse de la précision des modèles prédictifs	185
III-2-3-1 Retrait total	185
III-2-3-2 Retrait endogène	186
III-2-3-3 Retrait de dessiccation	188
III-2-4 Etude paramétrique	189
III-2-5 Optimisation et calage des paramètres	193
COCLUSION DE LA PARTIE III	196
CONCLUSION GENERALE	198

LISTE DES TABLEAUX

PARTIE I

Tableau I-1-1: Spécificité les plus courants d'un BAP à l'état frais.....	21
Tableau I-2-1: Matières premières et principaux constituants du ciment anhydre.....	27
Tableau I-2-2: Le comportement et le dégagement de chaleur des principaux minéraux du clinker.....	28
Tableau I-2-3: Classification des pores en fonction de leurs dimensions et des propriétés qu'ils affectent.....	32
Tableau I-4-1: Limites d'application du modèle CEB-MC 90.....	57
Tableau I-4-2: β SCen fonction du type de ciment, selon le modèle CEB MC90.	58
Tableau I-4-3: Limites d'application du modèle CEB-MC 99.....	61
Tableau I-4-4: Les valeurs du coefficient " α s" en fonction du type de ciment selon CEB-MC99..	62
Tableau I-4-5: Les valeurs des Coefficients " α s1 α s2" en fonction du type de ciment, selon le modèle CEB MC90-99.	62
Tableau I-4-6: Limites d'application du modèle Eurocode 2.	65
Tableau I-4-7 : Les valeurs de α s1 en fonction de type de ciment.	68
Tableau I-4-8 : Les valeurs de α s2 en fonction de la classe de ciment.	68
Tableau I-4-9 : Limites d'application du modèle B3.	71
Tableau I-4-10 : Les valeurs de " α 1" en fonction de type de ciment.	72
Tableau I-4-11: Les valeurs de " α 2" en fonction de mode de cure du béton.	73
Tableau I-4-12 : Les valeurs de "ks" en fonction de la forme du spécimen.	73
Tableau I-4-13 : Les valeurs de "kh" en fonction de l'humidité relative.	73
Tableau I-4-14 : Conditions standard telle que définie par l'ACI 209R-92.....	76
Tableau I-4-15 : Les valeurs de γ sh, tc pour une cure humide.....	79
Tableau I-4-16 : Les valeurs de γ sh, d en fonction de (d) selon ACI 209.....	80
Tableau I-4-17: Limites d'application du modèle GL 2000.	82
Tableau I-4-18: Les valeurs de k en fonction du type de ciment selon GL2000.....	83

PARTIE II

Tableau II-1-1 : Composition minéralogique du clinker.	88
Tableau II-1-2 : Composition chimique du clinker.	89

Tableau II-1-3: Analyse physique de l'addition calcaire.	90
Tableau II-1-4: Analyse chimique de l'addition calcaire.	90
Tableau II-1-5: Les résultats de l'analyse chimique effectuée sur l'eau.	95
Tableau II-1-6 : Caractéristiques du MEDAPLAST SP 40.....	96
Tableau II-1-7 : Les différents bétons et leurs désignations.	100
Tableau II-1-8: Composition d'un mètre cube des mélanges.	100
Tableau II-1-9 : Caractéristiques intrinsèques des BAP étudié.....	101
Tableau II-1-10: Les éprouvettes utilisées pour performances mécaniques.	104
Tableau II-1-11 : Spécifiés des BAP les plus courants à l'état frais.	108
Tableau II-1-12 : Essais de caractérisation mécanique.	109
Tableau II-2-1: Résultat d'essai d'étalement des BAP formulés.	119
Tableau II-2-2 : Résultat d'essai de la boîte en L des BAP formulés.	120
Tableau II-2-3: Pourcentage de laitance obtenue lors de l'essai de stabilité au tamis.	121
Tableau II-2-4: Temps d'écoulement du béton frais par l'essai de V-funnel.....	121
Tableau II-2-5: Pourcentage d'air occlus.	122
Tableau II-2-6: Résistances à la compression à 7 et 28 Jours.....	123
Tableau II-2-7: Résistances à la traction par flexion à 7 et 28 Jours.....	126

PARTIE III

Tableau III-1-1 : Equations des modèles européens.....	164
Tableau III-1-2 : les équations des modèles américains.....	171
Tableau III-1-3: Domaines de validité annoncés des six modèles de prédiction étudiés.....	172

LISTE DES FIGURES

PARTIE I

Figure I-1-1: Evolution de développement des BAP.	8
Figure I-1-2: Le pont Akashi Kaikyô.....	8
Figure I-1-3: Mise en place aisée du BAP par un seul ouvrier.	9
Figure I-1-4: Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment.	11
Figure I-1-5: Grande proportion en fines.	12
Figure I-1-6: Volumes relatifs de pâte de ciment différents pour un béton vibré et un BAP.	13
Figure I-1-7: les utilisations des superplastifiants.....	13
Figure I-1-8: Comparaison entre le volume des gravions de BAP et celle d'un béton vibré.....	14
Figure I-1-9: Approche générale de formulation des BAP.	15
Figure I-1-10 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité.....	17
Figure I-1-11: Principe de la mesure de l'étalement.	18
Figure I-1-12: Mesure de T_{500}	19
Figure I-1-13: Essai de V-funnel.....	19
Figure I-1-14 : Essai de la boîte en L.....	20
Figure I-1-15: Essai de stabilité aux tamis.	21
Figure I-1-16: Mesure de l'air occlus à l'aide d'un aéromètre.	22
Figure I-1-17 : Mesure de la masse volumique réelle.	22
Figure I-1-18 Illustration de l'effet de fillers.	24
Figure I-2-1: Schéma du Procédé technologique de fabrication du ciment.....	26
Figure I-2-2 : Micrographie en lumière réfléchie d'une section polie de clinker d'un ciment.....	27
Figure I-2-3: Mécanismes simplifiés d'hydratation des grains du ciment.....	29
Figure I-2-4 : Représentation schématique de l'hydratation du ciment.....	29
Figure I-2-5 : Représentation schématique des constituants anhydres du clinker et les produits d'hydratation.	30
Figure I-2-6: Vue au Microscope électronique à balayage d'une pâte de ciment : Portlandite (X) entre des C-S-H (#). La porosité capillaire est repérée par (O).....	30
Figure I-2-7 : Représentation schématique de la microstructure du gel de C-S-H selon FELDMEN et SERED.....	31
Figure I-2-8 : Répartition schématique des différents ordres de grandeur impliqués dans la structure de la pâte de ciment.....	33
Figure I-3-1: Description phénoménologique des changements de volume.	34
Figure I-3-2: (a) Déformation différée de retrait d'un spécimen non chargé : illustration de la cinétique de retrait (shrinkage) et, du gonflement (wetting) par variation) – (b) Variation volumique d'une éprouvette de béton au retrait.....	36
Figure I-3-3 : Les différents types de retrait du béton.....	36
Figure I-3-4: Schéma illustrant la contraction Le Chatelier.....	37

Figure I-3-5: Interface liquide/vapeur dans un pore non saturé	38
Figure I-3-6 : Influence du rapport E/C sur le retrait endogène de la pâte de ciment	39
Figure I-3-7: Influence de la finesse du ciment Portland sur le retrait endogène.....	40
Figure I-3-8 : Influence du superplastifiant sur le retrait endogène: a) Type b) Dosage	41
Figure I-3-9 :Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment.....	42
Figure I-3-10 : Influence du E/C et de la teneur en granulats sur le retrait des matériaux à matrice cimentaire conservés à HR= 50 % et à T=21 C° pendant 6 mois	45
Figure I-3-11 : Variation du retrait en fonction des dosages en ciment et en eau, et du (E/C) d'un béton mûri à l'eau pendant 28 jours puis séché pendant 450 jours.....	45
Figure I-3-12: Effet des granulats (types et rapport G/S) sur le retrait	46
Figure I-3-13 : Relation entre le retrait et le temps pour des bétons conservés à différentes humidités relatives	46
Figure 3-14: Décomposition des déformations de fluage propre du béton	47
Figure I-3-15 :Représentation simplifiée du fluage	48
Figure I-3-16: Influence du ratio (E/C) (série 5 : E/C=0.55 ; série 4 : E/C=0.40) sur le fluage spécifique	50
Figure I-3-17: Influence de la taille du granulat sur le fluage spécifique	51
Figure I-3-18 : Influence de la température sur le fluage	52
Figure I-3-19:L'influence de l'humidité relative sur le fluage.....	53
Figure I-3-20 : Vue d'ensemble du bâti de fluage en traction.....	53
Figure I-3-21: Dispositif de mesure de fluage en compression.....	54
Figure I-3-22: Dispositif de fluage en flexion 3 points EDOUARD.....	55
Figure I-3-23: Dispositif d'essai de flexion quatre points (bâti de fluage)	55
Figure I-4-1 :Organigramme du calcul du retrait selon le modèle CEB-MC 90.	60
Figure I-4-2: Organigramme du calcul du retrait selon le modèle CEB-MC 99.....	64
Figure I-4-3 :Représentation du rayon moyen h_0	67
Figure I-4-4 : Valeur de k_h en fonction du rayon moyen h_0	67
Figure I-4-5 :Valeurs de $[\epsilon_{cd,0}/\beta_{RH}]$ en fonction de la résistance à la compression " f_{c28} " et la classe de ciment.....	69
Figure I-4-6 : coefficient β_{ds} en fonction du rayon moyen h_0 . La durée d'exposition (t-ts) représente la durée de séchage	69
Figure I-4-7: Organigramme du calcul du retrait selon le modèle Eurocode 2.....	70
Figure I-4-8 : Organigramme montrant la méthode de calcul du retrait par le modèle B3.....	74
Figure I-4-9 :Organigramme montrant la méthode de calcul du retrait par le modèle ACI-209..	81
Figure I-4-10 :Organigramme montrant la méthode de calcul du retrait selon le modèle GL 2000.....	84

PARTIE II

Figure II-1-1: Ciment utilisé CPJ 42,5	88
Figure II-1-2: Les fillers calcaires utilisés (UF5, UF10, F20	91
Figure II-1-3 : Répartition granulaire d'UF5	91
Figure II-1-4 : Répartition granulaire d'UF10	92
Figure II-1-5 : Répartition granulaire de F20.....	92
Figure II-1-6 : Les granulats « sable et gravier ».....	93
Figure II-1-7: Courbe granulométrique du sable.....	93
Figure II-1-8 : Courbe granulométrique du Gravier (4/8).....	94
Figure II-1-9 : Courbe granulométrique du Gravier (4/6).....	94
Figure II-1-10: Organigramme des principales étapes de l'étude expérimentale.....	99
Figure II-1-11 : Le malaxeur utilisé.	102
Figure II-1-12 : Les phases de malaxage	103
Figure II-1-13 : a) Moules cylindriques (16x32) cm ² pour moulage des éprouvettes de béton,	
b) Eprouvètes cylindriques (16x32) cm ² destinées à l'essai de compression.	103
Figure II-1-14 : a) Moules prismatiques (7x7x28) cm ³ pour moulage des éprouvettes de béton,	
b) Eprouvètes prismatiques (7x7x28) cm ³ destinées à l'essai de traction par flexion.....	104
Figure II-1-15: a) Les moules prismatiques (7x7x28) cm ³ munies de plots pour moulage des éprouvettes de béton	
b) Les éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm ³ munies de plots destinées a la mesure de retrait	105
Figure II-1-16 : Cure d'éprouvettes prismatiques et cylindriques.	106
Figure II-1-17: Conservation des éprouvettes destinées à l'écrasement (compression et traction par flexion).....	106
Figure II-1-18 : conditions de conservation des éprouvettes de mesure des variations pondérales et dimensionnelles.....	107
Figure II-1-19 : Machine de l'essai de compression	110
Figure II-1-20: Machine et dispositif de l'essai de traction par flexion.	110
Figure II-1-21 : Ecrasement des éprouvettes : Cylindre (Compression), Prisme (Traction par flexion).	110
Figure II-1-22 : Comparateur avec une exactitude $\geq 0,005$ mm	112
Figure II-1-23: L'appareil de mesure de retrait	112
Figure II-1-24: Bille assure le contact entre le support du rétractomètre et.....	112
Figure II-1-25: Eprouvètes prismatiques munies de plots.	113
Figure II-1-26 : Présentation des conditions de conservation de différentes éprouvettes pour la mesure des variations pondérales et dimensionnelles	114
Figure II-1-27: Positionnement l'éprouvette sur l'appareil de retrait « rétractomètre »	116
Figure II-1-28 : Balance numérique.	117
Figure II-2-1 : Evolution de l'étalement des six BAP.....	119

Figure II-2-2: Etalement satisfait d'un béton autoplaçant (BAP homogène).	120
Figure II-2-3: Passage du BAP à travers les armatures sans blocage.....	121
Figure II-2-4 : Evolution de la résistance à la compression des différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours	124
Figure II-2-5: Influence du rapport (F/L) sur la résistance à la compression des différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours	125
Figure II-2-6: Influence de la finesse de filler calcaire sur la résistance à la compression des différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours.	126
Figure II-2-7 : Evolution de la résistance à la traction des différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours.	127
Figure II-2-8: Influence du rapport F/L sur la résistance à la traction des différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours.	128
Figure II-2-9: Influence de la finesse du filler sur la résistance à la traction des différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours.	129
Figure II-2-10 : Influence du mode de conservation sur les variations dimensionnelles de 1BAP5.	131
Figure II-2-11 : Influence du mode de conservation sur les variations dimensionnelles de 2BAP5.....	131
Figure II-2-12 : Influence du mode de conservation sur les variations dimensionnelles de 1BAP10 ..	131
Figure II-2-13 : Influence du mode de conservation sur les variations dimensionnelles de 2BAP10.....	131
Figure II-2-14: Influence du mode de conservation sur la variation dimensionnelle de 1BAP20	132
Figure II-2-15: Influence du mode de conservation sur la variation dimensionnelle de 2BAP20.....	132
Figure II-2-16 : Influence du taux de filler calcaire sur le retrait total de 1BAP5 et 2BAP5.....	133
Figure II-2-17: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait total de 1BAP10 et 2BAP10.....	133
Figure II-2-18: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait total de 1BAP20 et 2BAP20.....	134
Figure II-2-19: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait endogène de 1BAP5 et 2BAP5.....	135
Figure II-2-20: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait endogène de 1BAP10 et 2BAP10.....	135
Figure II-2-21: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait endogène de 1BAP20 et 2BAP20.....	135
Figure II-2-22: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait de dessiccation de 1BAP5 et 2BAP5.....	136
Figure II-2-23: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait de dessiccation de 1BAP10 et 2BAP10.....	136
Figure II-2-24: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait de dessiccation de 1BAP20 et 2BAP20.....	137
Figure II-2-25: Influence du taux de filler calcaire sur le gonflement de 1BAP5 et 2BAP5.....	138
Figure II-2-26: Influence du taux de filler calcaire sur le gonflement de 1BAP10 et 2BAP10.....	138
Figure II-2-27: Influence du taux de filler calcaire sur le gonflement de 1BAP20 et 2BAP20.....	138

Figure II-2-28: Influence de la finesse de filler calcaire sur le retrait de total de 1BAP5, 1BAP10 et 1BAP20.	140
Figure II-2-29: Influence de la finesse de filler calcaire sur le retrait de total de 2BAP5, 2BAP10 et 2BAP20.	140
Figure II-2-30: Influence de la finesse de filler calcaire sur le retrait total de 1BAP5, 1BAP10 et 1BAP20.	141
Figure II-2-31: Influence de la finesse de filler calcaire sur le retrait total de 1BAP5, 1BAP10 et 1BAP20.	141
Figure II-2-32: Influence de la finesse de filler calcaire sur le retrait de dessiccation de 2BAP5, 2BAP10 et 2BAP20.	142
Figure II-2-33: Influence de la finesse de filler calcaire sur le retrait de dessiccation de 2BAP5, 2BAP10 et 2BAP20.	142
Figure II-2-34: Influence de la finesse de filler calcaire sur le gonflement de 1BAP5, 1BAP10 et 1BAP20.	143
Figure II-2-35: Influence de la finesse de filler calcaire sur le gonflement de 2BAP5, 2BAP10 et 2BAP20.	143
Figure II-2-36 : Retrait des six bétons étudiés dans le milieu Ambiant (Retrait total).	144
Figure II-2-37 : Histogramme présente le retrait des six bétons étudiés dans le milieu Ambiant (Retrait total).	144
Figure II-2-38: Retrait des six bétons étudiés dans le milieu Couvert (Retrait endogène).	145
Figure II-2-39 : Histogramme présente le retrait des six bétons étudiés dans le milieu Couvert (Retrait endogène).	145
Figure II-2-40:Retrait des six bétons étudiés dans le milieu Dessiccation (Retrait de dessiccation).	145
Figure II-2-41 : Histogramme présente le retrait des six bétons dans le milieu Dessiccation.	146
Figure II-2-42 : Retrait des six bétons étudiés dans le milieu saturé (gonflement).	147
Figure II-2-43 : Histogramme présente le retrait des six bétons étudiés dans le milieu saturé (gonflement).	147
Figure II-2-44 : Variation de la perte en masse (%) des différents BAP en mode Ambiant.	149
Figure II-2-45 : Variation de la perte en masse (%) des différents BAP en mode Couvert.	150
Figure II-2-46 : Variation de la perte en masse (%) des différents BAP en dessiccation.	150
Figure II-2-47 : Variation de la perte en masse (%) des différents BAP en mode saturé.	151
Figure II-2-48: Retrait en fonction de la perte de masse en mode des six bétons à l'air libre	152
Figure II-2-49: Retrait en fonction de la perte de masse en mode des six bétons en mode couvert.	153
Figure II-2-50: Retrait en fonction de la perte de masse en mode des six bétons en mode dessiccation.	153
Figure II-2-51: Retrait en fonction de la perte de masse en mode des six bétons en mode saturé.	154

PARTIE III

Figure III-1-1:Retrait total du 1BAP5 calculé par les modèles européens.....	158
Figure III-1-2:Retrait endogène du 1BAP5 calculé par les modèles européens	158
Figure III-1-3:Retrait de dessiccation du 1BAP5 calculé par les modèles européens.....	158
Figure III-1-4: Gonflement du 1BAP5 calculé par les modèles européens.....	158
Figure III-1-5:Retrait total du 1BAP10 calculé par les modèles européens.....	159
Figure III-1-6:Retrait total du 1BAP10 calculé par les modèles européens.....	159

Figure III-1-7:Retrait de dessiccation du 1BAP10 calculé par les modèles européens.....	159
Figure III-1-8:Retrait de dessiccation du 1BAP10 calculé par les modèles européens.....	158
Figure III-1-9:Retrait total du 1BAP20 calculé par les modèles européens.....	160
Figure III-1-10:Retrait endogène du 1BAP20 calculé par les modèles européens.....	160
Figure III-1-11:Retrait total du 1BAP20 calculé par les modèles européens.....	160
Figure III-1-12 Gonflement du 1BAP20 calculé par les modèles européens.....	160
Figure III-1-13 Retrait total du 2BAP5 calculé par les modèles européens.....	161
Figure III-1-14 Retrait endogène du 2BAP5 calculé par les modèles européens.....	161
Figure III-1-15 Retrait de dessiccation du 2BAP5 calculé par les modèles européens.....	161
Figure III-1-16 Gonflement du 2BAP5 calculé par les modèles européens.....	161
Figure III-1-17 Retrait total du 2BAP10 calculé par les modèles européens.....	162
Figure III-1-18 Retrait endogène du 2BAP10 calculé par les modèles européens.....	162
Figure III-1-19: Retrait de dessiccation du 2BAP10 calculé par les modèles européens.....	162
Figure III-1-20: Gonflement du 2BAP10 calculé par les modèles européens.....	162
Figure III-1-21: Retrait total du 2BAP20 calculé par les modèles européens.....	162
Figure III-1-22: Retrait endogène du 2BAP20 calculé par les modèles européens.....	163
Figure III-1-23: Retrait de dessiccation du 2BAP20 calculé par les modèles européens.....	163
Figure III-1-24: Retrait de dessiccation du 2BAP20 calculé par les modèles européens.....	163
Figure III-1-25: Retrait total du 1BAP5 calculé par les modèles américains.....	165
Figure III-1-26: Retrait endogène du 1BAP5 calculé par les modèles américains.....	165
Figure III-1-27: Gonflement du 1BAP5 calculé par les modèles américains.....	165
Figure III-1-28: Retrait total du 1BAP10 calculé par les modèles américains.....	166
Figure III-1-29: Retrait endogène du 1BAP10 calculé par les modèles américains.....	166
Figure III-1-30: Gonflement du 1BAP10 calculé par les modèles américains.....	166
Figure III-1-31: Retrait total du 1BAP20 calculé par les modèles américains.....	167
Figure III-1-32: Retrait endogène du 1BAP20 calculé par les modèles américains.....	167
Figure III-1-33: Gonflement du 1BAP20 calculé par les modèles américains.....	167
Figure III-1-34: Retrait total du 2BAP5 calculé par les modèles américains.....	168
Figure III-1-35: Retrait endogène du 2BAP5 calculé par les modèles américains.....	168
Figure III-1-36: Retrait endogène du 2BAP5 calculé par les modèles américains.....	168
Figure III-1-37: Retrait total du 2BAP10 calculé par les modèles américains.....	169
Figure III-1-38: Retrait endogène du 2BAP10 calculé par les modèles américains.....	169
Figure III-1-39: Gonflement du 2BAP10 calculé par les modèles américains.....	169
Figure III-1-40: Retrait total du 2BAP20 calculé par les modèles américains.....	170
Figure III-1-41: Retrait endogène du 2BAP20 calculé par les modèles américains.....	170
Figure III-1-42: Gonflement calculé par les modèles américains.....	170
Figure III-1-43 : Retrait total calculé par les modèles européens et américains du béton 1BAP5.	174
Figure III-1-44 : Retrait endogène calculé par les modèles européens et américains du béton 1BAP5	174
Figure III-1-45 : Retrait endogène calculé par les modèles européens du béton 1BAP5.....	174

Figure III-1-46:Gonflement calculé par les modèles européens et américains du béton 1BAP5... 174	174
Figure III-2-1 : Comparaison des retraits totaux expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP5.....	177
Figure III-2-2 : Comparaison des retraits totaux expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP5.....	177
Figure III-2-3 : Comparaison des retraits totaux expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP10.....	178
Figure III-2-4 : Comparaison des retraits totaux expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP10.....	177
Figure III-2-5 : Comparaison des retraits totaux expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP20.....	178
Figure III-2-6 : Comparaison des retraits totaux expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP20.....	178
Figure III-2-7 : Comparaison des retraits endogènes expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP5.....	179
Figure III-2-8 : Comparaison des retraits endogènes expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP5.....	179
Figure III-2-9 : Comparaison des retraits endogènes expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP10.....	180
Figure III-2-10 : Comparaison des retraits endogènes expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP10.....	180
Figure III-2-11 : Comparaison des retraits endogènes expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP20.....	180
Figure III-2-12 : Comparaison des retraits endogènes expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP20.....	180
Figure III-2-13 : Comparaison des retraits de dessiccations expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP5.....	181
Figure III-2-14 : Comparaison des retraits de dessiccations expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP5.....	181
Figure III-2-15 : Comparaison des retraits de dessiccations expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP10.....	182
Figure III-2-16 : Comparaison des retraits de dessiccations expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP10.....	182
Figure III-2-17 : Comparaison des retraits de dessiccations expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP20.....	182
Figure III-2-18 : Comparaison des retraits de dessiccations expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP20.....	182
Figure III-2-19 : Comparaison des gonflements expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP5.....	183
Figure III-2-20 : Comparaison des gonflements expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP5.....	183
Figure III-2-21 : Comparaison des gonflements expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP10.....	184
Figure III-2-22 : Comparaison des gonflements expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP10.....	184

Figure III-2-23 : Comparaison des gonflements expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP20.....	184
Figure III-2-24 : Comparaison des gonflements expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP20.....	184
Figure III-2-25: Corrélation entre les retraits totaux calculés par le modèle B3 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.....	185
Figure III-2-26: Corrélation entre les retraits totaux calculés par le modèle GL2000 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.....	185
Figure III-2-27: Corrélation entre les retraits totaux calculé par le modèle CEB MC 90-99 et ceux mesurés expérimentalement à 90 jours.	186
Figure III-2-28: Corrélation entre les retraits totaux calculés par le modèle Eurocode 2 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.....	186
Figure III-2-29: Corrélation entre les retraits endogènes calculés par le modèle B3 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.....	187
Figure III-2-30: Corrélation entre les retraits endogènes calculés par le modèle GL2000 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.....	187
Figure III-2-31: Corrélation entre les retraits endogènes calculés par le modèle GL2000 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.....	187
Figure III-2-32: Corrélation entre les retraits endogènes calculés par le modèle CEB MC 90-99 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.	188
Figure III-2-33: Corrélation entre les retraits de dessiccation calculés par le modèle CEB MC 90-99 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.	189
Figure III-2-34: Corrélation entre les retraits de dessiccation calculés par le modèle Eurocode 2 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.	189
Figure III-2-35 : Retrait total calculé par le modèle B3.	190
Figure III-2-36 : Retrait total calculé par le modèle GL2000.	190
Figure III-2-37 : Retrait total calculé par le modèle CEB MC 90-99.	190
Figure III-2-38 : Retrait total calculé par le modèle Eurocode2.	190
Figure III-2-39 : Retrait endogène calculé par le modèle B3.....	191
Figure III-2-40 : Retrait endogène calculé par le modèle GL2000.	191
Figure III-2-41 : Retrait endogène calculé par le modèle CEB MC 90-99.	191
Figure III-2-42 : Retrait endogène calculé par le modèle Eurocode 2.	191
Figure III-2-43 : Retrait de dessiccation calculé par le modèle CEB MC 90-99.	192
Figure III-2-44 : Retrait de dessiccation calculé par le modèle l'Eurocode 2.	192
Figure III-2-45 : Représentation graphique des courbes expérimentales données par l'Origin.8 pour le retrait de dessiccation de 1BAP5 « premier domaine »	193
Figure III-2- 46: Représentation graphique des courbes expérimentales données par l'Origin.8 pour le retrait de dessiccation de 1BAP5 « deuxième domaine »	193
Figure III-2-47 : Représentation graphique des courbes expérimentales données par l'Origin.8 pour le retrait de dessiccation de 2BAP5 « premier domaine »	194
Figure III-2-48 : Représentation graphique des courbes expérimentales données par l'Origin.8 pour le retrait de dessiccation de 2BAP5 « deuxième domaine »	194
Figure III-2-49 : Représentation graphique des courbes expérimentales données par l'Origin.8 pour le retrait de dessiccation de 1BAP20.....	194

Figure III-2-50 : Représentation graphique des courbes expérimentales données par l'Origin.8 pour le retrait de dessiccation de 2BAP20.....	194
---	-----

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

Nous constatons une dynamique sociale très importante au niveau de certains pays qui sont contraint pour satisfaire leurs besoins de réaliser de multiples projets. L'Algérie fait partie de ces pays, nous relatons un certain nombre d'investissement dans tous les secteurs (routier, ferroviaire, portuaire, industriel....) ayant une relation directe avec le développement du pays. Implicitement ces projets sont caractérisés par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples) et une forte concentration d'armatures ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle. A ce titre nous pouvons citer ces projets : Le Metro et la grande mosquée d'Alger, les ouvrages relatives à l'autoroute est-ouest : les ponts, les tunnels, ainsi que les projets du viaduc Trans-Rhummel et les tramways d'Oran, Alger et de Constantine. Plusieurs ports ont été réalisés ou en cours (Djenjen,.....).

Afin d'adapter les bétons à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de bétons se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (ségrégation, ressuage et tassement faibles), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité.

Au cours des trente dernières années, la profession du béton a bénéficié d'une succession d'évolution et de progrès considérables, plusieurs types de bétons sont apparus : les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM), les bétons de poudre réactive (BPR) et les bétons autoplaçants (BAP). Ces derniers désignent des bétons très fluides, homogènes et stables, mis en place sans vibrations. Leur compaction s'effectue par le seul effet gravitaire et ils confèrent à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration d'où le qualificatif d'autoplaçant.

L'intérêt des bétons autoplaçants et leur rapide succès auprès des maîtres en œuvre tient à leur facilité de mise en œuvre sans apport extérieur d'énergie, leur gains de productivité qui se traduisent en terme de temps, de main d'œuvre et de matériel. De plus grâce à leur grande fluidité, ils peuvent être employés pour les ouvrages de formes architecturales complexes ou pour des zones fortement ferraillées.

L'utilisation des additions minérales dans les bétons en remplacement au ciment est une pratique courante depuis de nombreuses années. En Algérie, du fait de leur grande disponibilité et leur prix modère, les additions calcaires sont majoritairement utilisées. Ces derniers permettent donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton. L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

L'observation du comportement du béton montre que le béton est un matériau en continuelle évolution entraînant des problèmes de diminution de volume, en dehors de tout chargement extérieur qui sont communément appelées "retraits", la connaissance des effets du retrait sur le comportement des matériaux à matrice cimentaire est d'un grand intérêt du fait que toute structure subit, pendant sa vie, un séchage qui conduit dans de très nombreux cas à une microfissuration, de laquelle dépend sa durabilité.

INTRODUCTION GENERALE

Pour pallier aux nouvelles exigences des constructions actuelles et que l'ouvrage soit durable en fonction de l'évolution du temps, la durabilité est devenu un objectif principal à atteindre dans l'élaboration du béton. De nombreuses influences physico-chimiques ou mécaniques peuvent avoir des effets négatifs sur la durabilité. Afin d'assurer une haute et persistante durabilité, le concept d'un béton avec moins de retrait et par conséquent moins de fissures est d'actualité.

Ce travail a donc pour objectif d'étudier et mieux comprendre le comportement différé sans charge « retrait » des bétons autoplaçants en nous focalisant sur l'influence des paramètres jouant sur le comportement des BAP plus particulièrement, de composition (la finesse de filler et le taux de substitution de ciment par filler) et environnemental (Humidité relative).

La nécessité d'établir des relations analytiques identifiant les phénomènes à susciter est un intérêt majeur chez les chercheurs. Pour cela une banque de donnée est devenue nécessaire.

En 1978, Bazant et Panula ont commencé à recueillir les données sur le retrait et le fluage du monde entier pour créer une banque des données qui a été élargi par Muller et Panula dans le cadre de la collaboration entre ACI et CEB. La banque des données est connue maintenant sous le nom de « RILEM ».

Les règlements actuels proposent ainsi d'estimer les déformations différées en prenant en compte de nombreux paramètres relatifs aux caractéristiques mécaniques du béton, au type de liant et aux conditions environnementales. La plupart de ces règles de calcul correspondent à des lois analytiques établies à partir de calages sur des bases de données expérimentales. Par conséquent, leurs estimations demeurent correctes dans la majorité des cas pour les bétons ordinaires. Mais les dernières évolutions des matériaux à matrice cimentaire (Béton à Hautes Performances, Béton Autoplaçant, Béton Fibré...) et la grande variété des formulations de bétons autoplaçants (BAP) ont mis en évidence des écarts pouvant être significatifs.

Notre humble contribution dans ce mémoire s'articule de la manière suivante :

- La première partie comporte quatre chapitres où nous avons présenté une analyse bibliographique.
- La deuxième partie est consacrée à la présentation des matériaux utilisés et les résultats d'études expérimentales, constituée de deux chapitres
- La troisième partie est dédiée à une étude comparative entre les résultats expérimentaux et celles calculés par les différents modèles réglementaires. Aussi, nous avons essayé de proposer des lois mathématiques caractérisent le retrait de dessiccation sur environnement ORIGIN.

Partie I : Chapitre I-1 à I-4.

La première partie est consacrée à une étude bibliographique où nous présentons un contexte général de l'étude, à savoir un bref historique sur les bétons autoplaçants depuis leur première confection au début des années 80, l'étendue de leur utilisation dans le monde ainsi qu'une définition de ses constituants comme les granulats, le ciment et les adjuvants (superplastifiants et additions minérales), leurs formulations et aussi un aperçu sur les différents essais auxquels doivent être testés ces bétons à l'état frais et durci et son

INTRODUCTION GENERALE

comportement à long terme (retrait et fluage) accompagné des diverses hypothèses sur les mécanismes à l'origine de ces variations dimensionnelles ainsi que les paramètres influents. Enfin, nous abordons dans le chapitre 4, l'aspect modélisation avec différents modèles réglementaires existants en détaillant les paramètres pris en compte et les limites d'application.

Partie II : Chapitre II-1 et II-2.

Cette partie est réservée à l'étude expérimentale, Le premier chapitre est consacré pour la définition des matériaux utilisés (fillers calcaires, ciments, granulats, superplastifiants et eau) en justifiant leur choix, en présentant aussi les principes de la méthode de formulation utilisée. Au cours de nos travaux, six formulations ont été préparé en gardant le même squelette granulaire, la même quantité de liant et en utilisant la même addition « filler calcaire », mais en incorporant différents finesse et dosage (ciment a été remplacé par 10% et 20% de filler calcaire avec trois finesse UF5, UF10, F20) afin d'analyser les effets sur leurs propriétés à l'état frais, durci et aussi le retrait et la perte de masse.

A la suite de cette partie, nous exposons La caractérisation à l'état frais des BAP (l'étalement, la boîte en L, V-funnel et la stabilité au tamis) ainsi que l'air occlus et les protocoles expérimentaux qui nous ont permis de mesurer toutes les grandeurs mécaniques (résistances mécaniques à la compression et à la traction par flexion) et les déformations différées sans charge et variations pondérales sur béton durci. Cela est effectué pour trois modes de conservation : Ambient ($T = 20 \pm 5^\circ$, $HR = 50 \pm 5\%$), Couvert ($T = 20 \pm 5^\circ$, $HR = 80 \pm 5\%$) et immergé dans l'eau ($T = 20 \pm 5^\circ$, immersion dans l'eau).

Partie III : Chapitre III-1 et III-2.

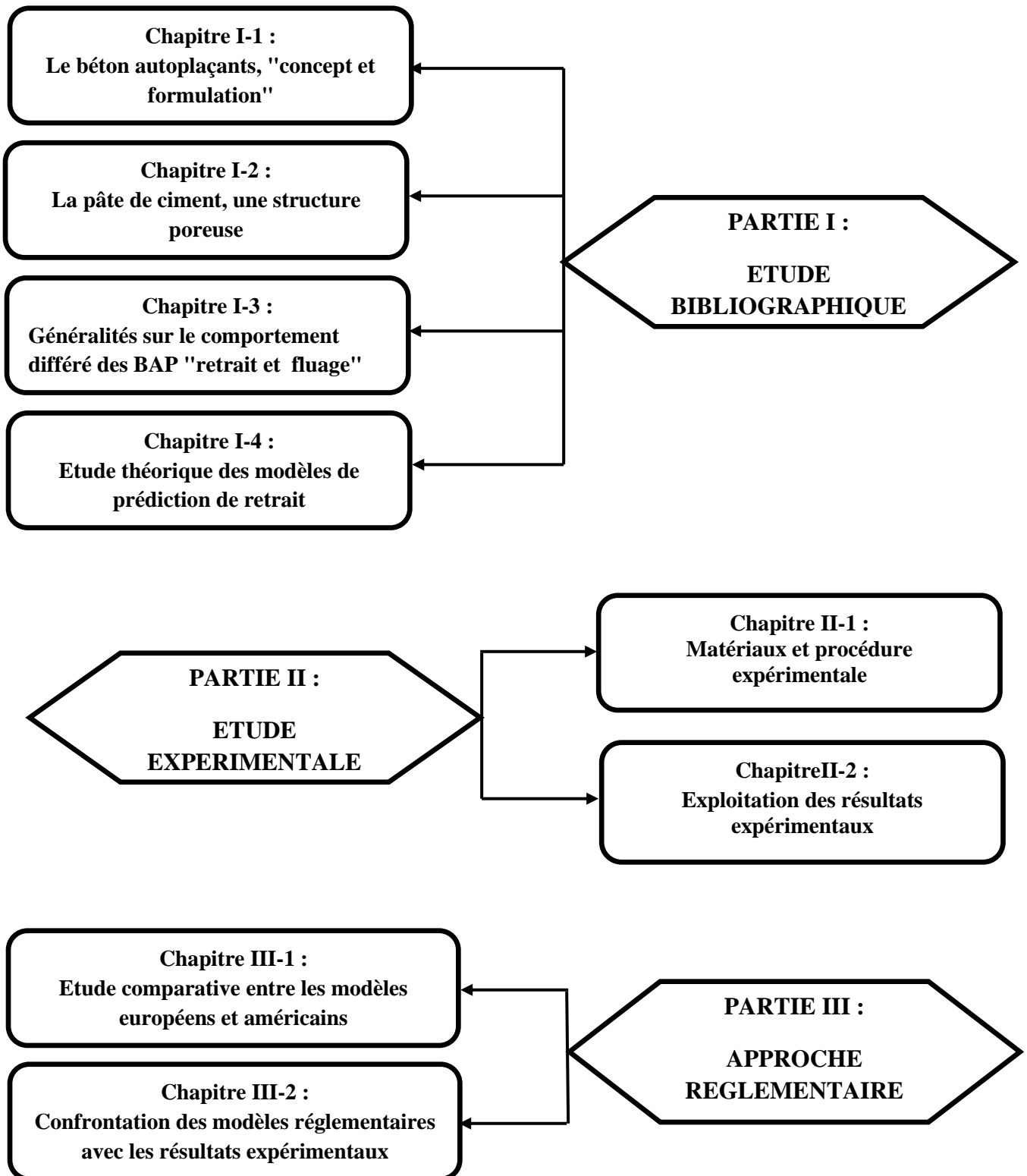
Le premier chapitre de cette partie présente une étude comparative entre les modèles réglementaires en Europe (CEB MC 90, CEB MC 90-99 et Eurocode 2) et aux Etats-Unis (ACI 209, B3, GL2000). Le dernier chapitre confronte d'une part les résultats expérimentaux de nos essais aux quatre modèles réglementaires de prédiction de retrait : deux modèles européens (CEB MC90-99 et l'Eurocode 2) et deux modèles américains (B3 et GL 2000). Cette comparaison permettra de vérifier si ces codes de calcul établis pour les bétons ordinaires (BO) sont toujours valables pour les bétons autoplaçants (BAP) ou s'il convient d'envisager des corrections complémentaires. D'autre part, tous les résultats de modèles réglementaires de notre projet de recherche sont portés en fonction de la résistance mécanique du béton et humidité relative. Cette approche devrait nous permettre d'établir des conclusions plus générales sur l'évolution des facteurs étudiés.

Le retrait de dessiccation si apparait pas implicitement, ceci nous a même proposé des lois mathématiques calées sur les courbes expérimentales et théoriques sous environnement origine.

La conclusion générale clôture ce mémoire en synthétisant les principaux résultats. Des perspectives de recherche sont aussi présentées pour continuer à apporter de nouvelles informations pertinentes à ces nouveaux matériaux du génie civil.

INTRODUCTION GENERALE

La figure suivante illustre la structure du mémoire:



PARTIE I :
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I-1 LE BETON AUTOPLAÇANT, « CONCEPT ET FORMULATION ».

I-1-1 Historique :

Beaucoup de structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons ordinaires. Afin d'adapter les bétons à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de bétons se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (ségrégation, ressuage et tassement faibles), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité. Ces bétons désignent des bétons spéciaux à haute performance qui se caractérisent essentiellement par leur fluidité à l'état frais d'où le qualificatif d' « autoplaçant BAP » ou d' « autonivelant ».

Les BAP sont des bétons ont la capacité de se mettre en place sous l'effet de la gravité, sans apport de vibration même dans les coffrages très ferrailés. L'idée de ces bétons a été lancée vers le milieu des années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo, puis a été rapidement reprise par les grands groupes industriels Japonais (Kajima, Taisei, Obayashi). L'essor important de ce type de bétons se justifie par le fait qu'ils présentent deux intérêts techno- commerciaux :

- facilité de mise en place : diminution du temps de réalisation, diminution du personnel donc du coût de la main-d'œuvre ; ainsi que la possibilité d'utiliser des coffrages de formes complexes et de forte densité d'armatures.
- amélioration de la qualité du béton : (résistance et durabilité), qui est indépendante du savoir-faire des ouvriers.

Les chercheurs et les industriels Japonais n'ont pas tout de suite publié leurs recherches, la viabilité des bétons autoplaçants devait être prouvée, plusieurs équipes de recherche et de développement s'y sont consacrés, des réalisations en vraie grandeur ont confirmé le travail mené au Japon depuis plus de dix ans.

Depuis leur apparition au Japon, les bétons autoplaçants ont été progressivement utilisés partout en Europe, semblent être amenés à remplacer, à terme, les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications.

L'intérêt des autres pays pour ce type de béton n'est apparu qu'après quelques années, mais il est en plein essor. En France le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) se penche sur la question au début des années 90, les premières applications en grandeur réelle sont réalisées au début de 1988, à Brest, sur le chantier d'extension du parc de loisirs Océan polis pour des voiles courbes de grande hauteur fortement ferrailés. Aussi lors de la construction d'un collège dont les façades sont inclinées, à géométrie complexe, et des formes non répétitives excluant toute possibilité de préfabrication.

Leurs qualités les destinent à un bel avenir dans de nombreuses applications qu'il s'agisse de bétons prêts à l'emploi ou de produits préfabriqués en usine.

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-1 LE BETON AUTOPLACANT, « CONCEPT ET FORMULATION »

Le challenge actuel consiste à maîtriser la formulation du béton autoplaçant dans plusieurs classes de résistance pour un prix compétitif, en prenant en compte d'une part le cahier des charges intégrant les performances rhéologiques et d'autre part les techniques et matériaux disponibles.

On parle de béton autonivelant (BAN) pour les dalles et toutes les parois horizontales et de béton autoplaçant (BAP) pour les murs et toutes les parois verticales. (J-C.Braquenier et J.Desnyter, 2000), (CSTC-centre de recherche, 2004) cité à [N.Rebbouh ,2006], [T.Sedran, 1995]

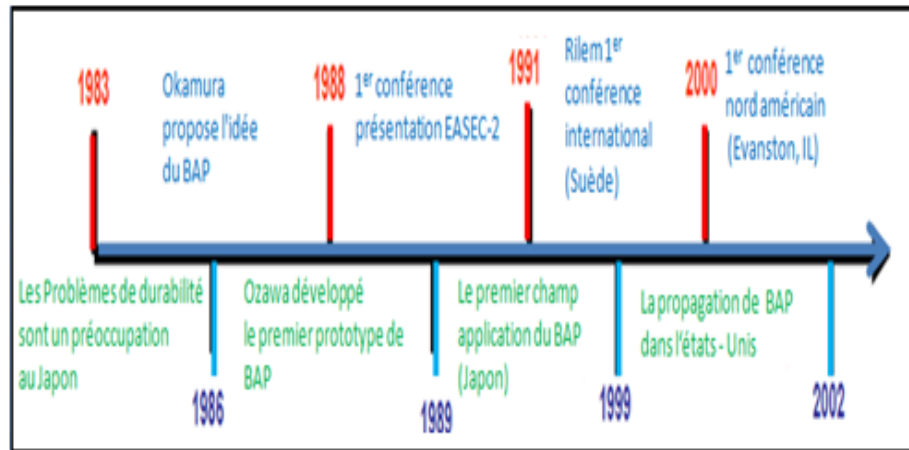


Figure I-1-1: Evolution de développement des BAP. [N.Rebbouh ,2006].

A titre d'exemple, nous citerons quelques réalisations japonaises :

- le pont Kiba Park. où 650 m³ de bétons autoplaçants ont été utilisés avec une résistance à la compression à 28 jours de 60 MPa.
- le pont Akashi Kaikyo (Figure I-1-2), le plus long pont suspendu au monde (3910 m, 1991 m entre les deux pylônes) où 770 000 m³ de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration, l'utilisation de bétons autoplaçants a diminué le délai de réalisation du pont Akashi-Kaikyo de 6 mois. [E.Proust, 2002]

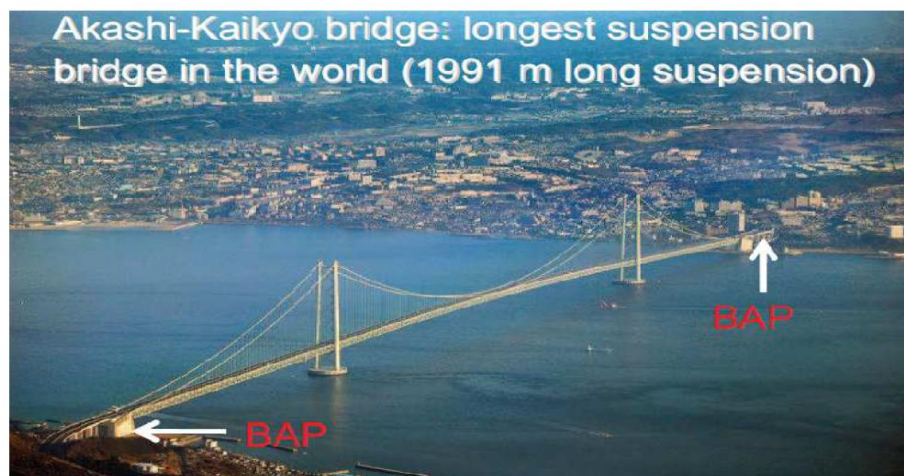


Figure I-1-2: Le pont Akashi Kaikyo. [H.Zahouani , A.Touaiti, 2011].

I-1-2 Définition:

Le béton autoplaçant (BAP pour les éléments verticaux et BAN pour les éléments horizontaux, ou SCC, en anglais, pour self-compacting concrete) est un béton fluide, très déformable, homogène et stable, il est capable de s'écouler sous son propre poids quel que soit le confinement du milieu sans apport d'énergie extérieure (vibration) et reste homogène au cours l'écoulement et une fois mis en place (absence de ségrégation dynamique et statique).

La mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une grande fluidité du matériau, mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité.

Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiant et de fines (et/ou) l'emploi d'agents de viscosité.

La fluidité n'est pas la seule propriété recherchée, car il faut bien s'assurer de l'homogénéité de l'ensemble pâte-granulats. De façon corollaire, le mélange du BAP doit être très cohésif et très stable lors de la mise en place et cela jusqu'à son durcissement.

Ces bétons présentent plusieurs avantages qui justifient l'intérêt nouveau que leur portent les industriels :

- Absence de vibration qui réduit les nuisances sonores,
- Bétonnage de zones fortement ferraillées et à géométrie complexe,
- Pénibilité du travail moindre,
- Réduction du coût de la main d'œuvre, durée de construction plus courte,
- Des aspects de surface d'une bonne régularité et un meilleur enrobage des armatures.

Cependant, ces avantages s'accompagnent fatalement de certains inconvénients :

- augmentation du coût des matières premières (additions, adjuvants),
- modifications des outils de fabrication (outils de mise en place). (H.Okamura et m.Ouchi, 1999) cité à [S.Assié, 2004].



Figure I-1-3: Mise en place aisée du BAP par un seul ouvrier.

I-1-3 Matières premières utilisées dans les bétons autoplaçants:

Toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide, solide) et de sa nature minéralogique, chimique et morphologique. Ainsi, nous allons décrire dans ce chapitre les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (granulats, ciment, additions minérales, adjuvants et eau), et les paramètres influents.

Chaque constituant joue un rôle différent dans l'écoulement et dans le comportement rhéologique du béton, et des interactions existent entre certains composants [M.El barrak, 2000].

I-1-3-1 Granulats :

Les granulats (sable et gravier) constituent le squelette du béton. Ils sont définis comme un ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, et doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. (J. Baron, JP. Ilivier, 1996) cité à [N. Tabet, 2012]. Les granulats permettent tout d'abord de réduire considérablement le coût global du béton (cinq fois moins chers que le ciment), mais leur influence est déterminante sur la résistance mécanique du béton à l'état durci. La résistance mécanique du béton dépend fortement de la nature des granulats (propriétés intrinsèques), et de la compacité du squelette global, ainsi que de l'adhérence entre les granulats et la pâte du béton. (F. Larrard, 2000) cité à [N. Tabet, 2012]. Par ailleurs, le dosage des granulats peut avoir une influence sur les propriétés d'ouvrabilité des bétons. Pour obtenir un béton autoplaçant, le volume du gravier et la taille maximale des granulats ont été réduits pour réduire les frictions et éviter les blocages dans des zones confinées. [N. Tabet, 2012].

I-1-3-2 les additions minérales:

Différentes additions minérales peuvent être ajoutées au béton, substituant ou non une partie du ciment, afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou de lui conférer des propriétés particulières. Ce sont des matériaux finement divisés parmi lesquelles nous citons les fillers, la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau qui proviennent principalement de l'industrie. Ces fines présentent plusieurs avantages dans l'industrie et la formulation des bétons.

L'incorporation des additions minérales à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton. Par ailleurs, l'utilisation généralisée des additions minérales dans le monde contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO₂ de l'industrie cimentière dans la nature. En général, les additions minérales influencent fortement les propriétés des bétons à l'état durci ; elles permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. En raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros, contribuant ainsi à avoir

un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau. (F.Lange, H.Mörte, V. Rudert, 1997) cité à [N.Tabet, 2012].

Cette optimisation de la granulométrie du squelette total, aide aussi à limiter le ressuage du béton et à augmenter la cohésion de l'ensemble. Par ailleurs, les additions minérales réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique. [N.Tabet, 2012].

I-1-3-3 Ciment :

Les ciments les plus courants dans le monde du génie civil, sont les ciments à base de clinker Portland, produit obtenu par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile. Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau, et forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. Le durcissement du ciment est principalement dû à l'hydratation du silicate tricalcique, un composant majeur du clinker. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, en liant les différents constituants. Le clinker est accompagné de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) nécessaire pour régulariser la prise, (J.Baron, JP.Ilivier, 1996) cité à [N.Tabet, 2012]

I-1-3-4 Superplastifiants :

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités (0.2% à 2%), afin d'en améliorer certaines propriétés. Les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons maniables et ouvrables par défloculation des grains de ciment. À une consistance donnée ils offrent la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et la mise en place du béton, et par conséquent augmenter les caractéristiques mécaniques du béton.

L'utilisation de superplastifiant dont l'action est schématisée sur la Figure I-1-4, permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau [M.I. Khalifa, 2009].

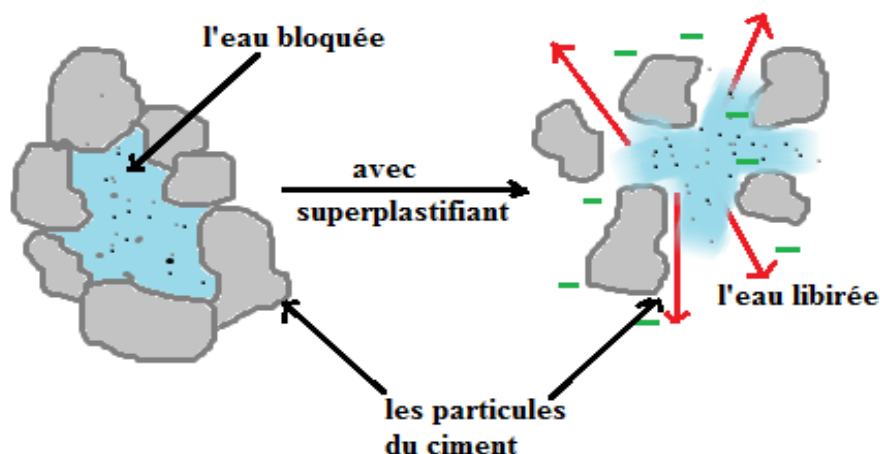


Figure I-1-4: Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment
[N.Rebbouh, 2006].

I-1-3-5 L'agent colloïdal ou de viscosité :

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

L'utilisation d'agents de viscosité a pour but de stabiliser le béton en fixant l'eau dans le mélange, ce qui diminue le phénomène de ressuage et donne une plus grande cohésion au béton. Ils se présentent généralement sous forme de poudre. [M.I. Khalifa, 2009].

I-1-3-6 Eau:

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.). Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats.

Cependant l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais. [M.El barrak, 2005].

I-1-4 Spécificité de la composition d'un béton autoplaçant:

Après plusieurs recherches effectuées en laboratoires, les essais ont montré que pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un béton autoplaçant doit avoir certaines caractéristiques.

I-1-4-1 Grande proportion en fines:

Le but de l'augmentation de la quantité de fines (qui peut atteindre environ 500 kg/m^3) est d'assurer la maniabilité, de limiter les risques de ressuage et de ségrégation. De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de formulations appropriées aux BAP.

Les compositions tirées de la littérature (T.Sedran,1999), (M. Sonebi,2003), (Y. Xie, B. Liu, J.Yin, S. Zhou,20 01), (N. Bouzoubaa, M. Lachemi ,2000) et (V. Bokan Bosiljkov, 2003) soulignent que les BAP contiennent un volume de fines plus important que les bétons classiques . [A. El Hilali,2009]

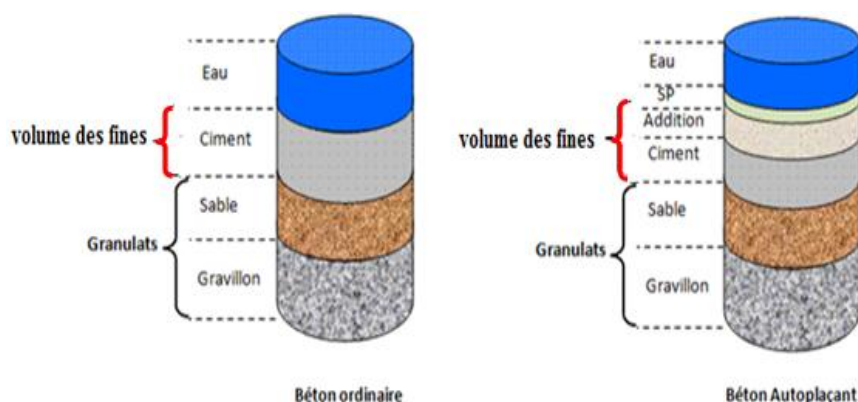


Figure I-1-5: Grande proportion en fines. [A. El Hilali, 2009]

I-1-4-2 Volume de pâte important:

Nous entendons par pâte le mélange : ciment, eau, additions et air occlus, un volume de pâte important permet d'écarter les granulats les uns des autres et de diminuer les forces de frottements qui ont tendance à limiter l'étalement du béton. [A. El Hilali, 2009].

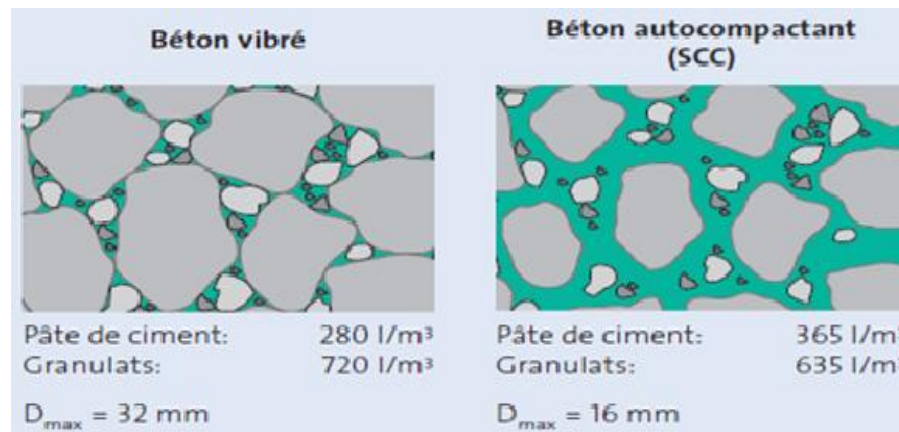


Figure I-1-6: Volumes relatifs de pâte de ciment différents pour un béton vibré et un BAP. [A. El Hilali, 2009]

I-1-4-3 Ajouts de super plastifiant et de rétenteurs d'eau (agent de viscosité):

Afin de modifier la fluidité d'un BAP, il est nécessaire d'utiliser un superplastifiant qui augmente l'ouvrabilité du béton mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage. Pour minimiser l'effet négatif du superplastifiant, on ajoute généralement un agent de viscosité (appelé aussi agent colloïdal). [Holcim]

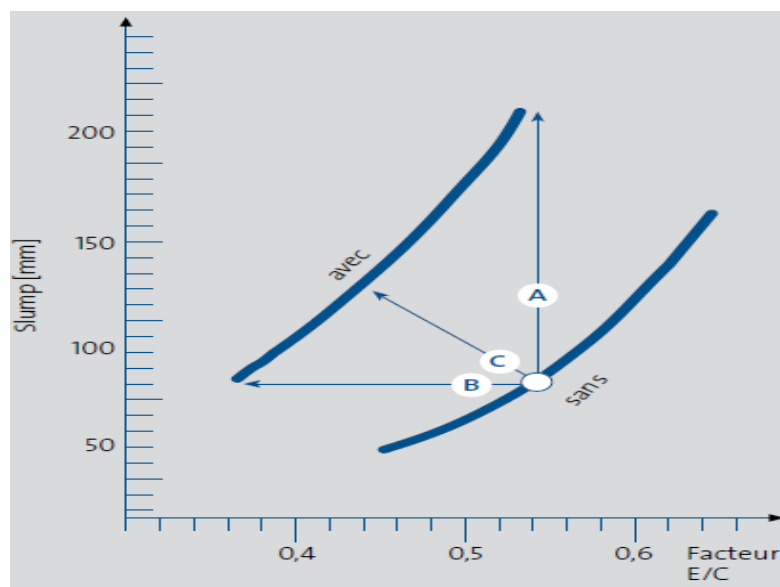


Figure I-1-7: Les utilisations des superplastifiants. [Holcim]

- A : Augmentation de la fluidité (teneur en eau égale).
- B : Diminution de la teneur en eau (à fluidité égale).
- C : Diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité.

I-1-4-4 Faible volume en gravillons:

Lors de l'écoulement du béton dans des zones confinées, les gros granulats ont tendance à interrompre l'écoulement du béton. Pour minimiser les risques de blocage, nous optons pour des granulats de diamètre inférieur à 20 mm. En général, le rapport (gravillon/sable) est de l'ordre de 1 dans les BAP.

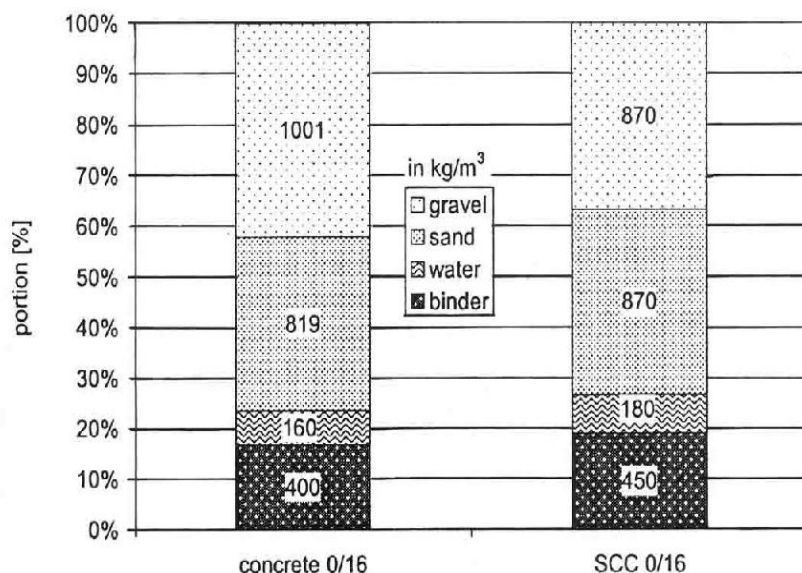


Figure I-1-8: Comparaison entre le volume des gravillons de BAP et celle d'un béton vibré (d'après **Jacobs, 1999**) cité à **[S.ASSIE, 2004]**

I-1-5 Méthode de formulation de béton:

Formuler un béton, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants, le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, c'est-à-dire l'affaissement au cône d'Abrams. Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées, comme, par exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal.

Pour l'instant, il n'existe pas de méthode générale de formulation pour le BAP. Cependant, plusieurs méthodes de formulation ont été développées dans des pays différents. (**Okamura et Ouchi**) ont premièrement proposé une méthode empirique de formulation du BAP au Japon. **[G.Benkechache, 2007]**.

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton. **[S. Brahim]**

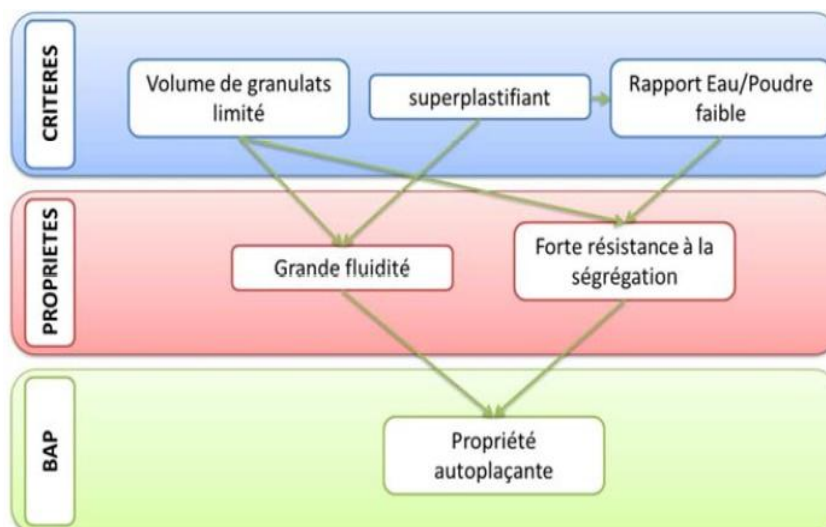


Figure I-1-9: Approche générale de formulation des BAP. [P.Diederich, 2010]

I-1-5-1 Méthode Japonaise : Méthode basée sur l'optimisation du mortier:

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants:

a) Dosage des gravillons : Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m³.

Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

b) Dosage du sable : Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

c) Dosage du liant : La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³).

Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

d) Dosage de l'eau et du super plastifiant : Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. Nous réalisons des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

I-1-5-2 Méthode Suédoise:

La méthode suédoise est proposée par Petersson et al en 1996. Elle est basée sur l'étude effectuée par Tangtermsirikul et al en 1995. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport (G/S) final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat.

I-1-5-3 Méthode Française :

Méthode française proposée par De Larrard et al en 1994, au LCPC. Un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- Les distributions granulaires,
- Les proportions du mélange,
- La compacité propre,
- La densité apparente.

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- La proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple);
- Le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente;
- Le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé.
- Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).
- La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.104, la teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion (liant/filler) est maintenue constante. Les proportions (granulats/ phase liante) sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée, basée sur les prévisions du modèle.

La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes. **[S. Brahim]**

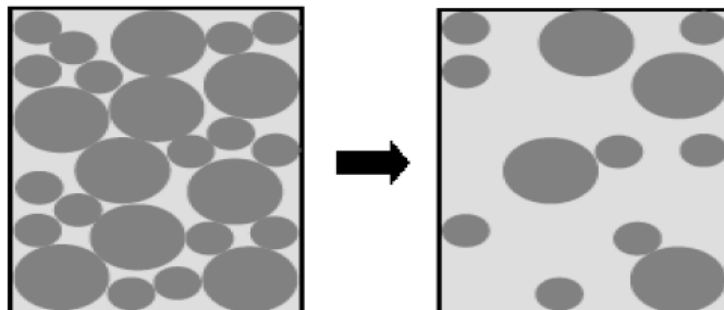


Figure I-1-10 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité [N.Tabet, 2012]

I-1-6 Influence des paramètres de formulation sur les propriétés à l'état frais:

I-1-6-1 Rôle des adjuvants:

a) Utilisation de superplastifiants: L'apparition des bétons autoplaçants et des bétons à Hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP). L'action principale des superplastifiants est de défloculer les grains de ciment. L'ajout d'un superplastifiant aide à augmenter la fluidité.

Sugamata et al ont étudié l'influence de différents superplastifiants et de leurs dosages sur le maintien rhéologique dans le temps d'un mortier. Leurs résultats montrent que l'augmentation du dosage de superplastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur. Cette caractéristique est maintenant bien connue. Il s'agit du dosage à saturation, c'est-à-dire le dosage au-dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la fluidité du mélange. Actuellement, les superplastifiants sont donc utilisés à un dosage proche du dosage à saturation. [T.SEDRAN, 1999]

b) L'utilisation d'agent de cohésion: Ces produits, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse.

I-1-6-2 Rôle des fines:

Pour assurer une maniabilité suffisante, une fluidité importante et un meilleur arrangement granulaire tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines joue un rôle important dans la fluidité car ils réduisent les interactions entre les plus gros grains. Il est donc nécessaire dans le cas des BAP de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Différentes additions sont citées dans la littérature : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice et filler calcaire. [F. Hanaa, 2009]

I-1-6-3 Autre paramètres de formulation:

a) Volume de pâte élevé : Les BAP contiennent un volume de pâte important, typiquement de 330 à 400 l/m³, dont le rôle est d'écarter les granulats les uns des autres.

Le volume de pâte dans un BAP représente 35 à 45 % du volume total, alors que dans un béton traditionnel il est de 20 à 35 %.

b) Volume de gravillons: Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport (gravillon/sable) de l'ordre de 1 dans les BAP.

I-1-7 Essai de caractérisation des BAP à l'état frais:

Avant d'accepter une composition comme étant celle d'un BAP, il faut s'assurer que les propriétés du béton à l'état frais obéissent à certains critères établis selon les recommandations [AFGC, 2000]. Différents essais spécifiques permettent de caractériser les BAP à l'état frais. On présentera ceux qui ont été utilisés dans cette étude :

- la mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement et l'essai de V funnel),
- la mobilité en milieu confiné (décrite par l'essai de la boîte en L),
- la stabilité est la résistance à la ségrégation et au ressuage (décrite par l'essai de la stabilité au tamis) [S.Assié, 2004]

I-1-7-1 Essai d'étalement: [NF EN 12350-8]:

a) Mesure de l'étalement: Le béton étant un matériau moulable, il doit présenter, à l'état frais, des caractéristiques lui permettant de bien remplir les coffrages et de bien enrober les armatures. Cette aptitude est appelée ouvrabilité. Elle est qualifiée par l'essai d'étalement au cône d'Abrams.

L'essai au cône d'Abrams est l'un des essais empiriques les plus utilisés, permettant de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné réalisé à l'aide du cône d'Abrams. Nous en tirons deux grandeurs spécifiques : l'étalement SF et le temps écoulé pour obtenir une galette de diamètre 500 mm (T_{500}). [S.Assié, 2004].

Le principe de la conduite de l'essai est connu et est simple. Le résultat s'exprime en termes de moyenne de deux diamètres de la galette en arrondissant au centimètre supérieur. [A. El Hilali, 2009]



$$Etalement = D_{moyen} = SF = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

Figure I-1-11: Principe de la mesure de l'étalement.

Les valeurs d'étalement sont habituellement fixées entre 60 et 75 cm, sans auréole de laitance ou d'amoncellement de gros granulats au centre en fin d'essai [AFGC, 2000].

b) Mesure de la vitesse d'étalement: La vitesse d'étalement peut aussi nous renseigner sur la viscosité, l'ouvrabilité du béton est d'autant plus grande que la vitesse d'étalement est élevée. Après soulèvement du cône, nous chronométrons le temps nécessaire, pour que le béton forme un cercle de 500 mm de diamètre nous le notons T_{500} . Les valeurs de T_{500} obtenues pour cet essai vont de 4 jusqu'à 10 secondes l'équivalent d'une vitesse de 2.5 et 6.25 cm/s.[N.Rebbouh ,2006]

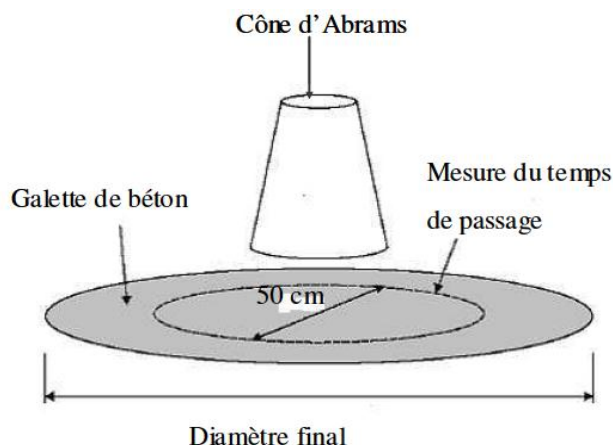


Figure I-1-12: Mesure de T_{500} .

I-1-7-2 Essai de V (V funnel): [NF EN 12350-9]

Cet essai fournit une indication sur la viscosité du béton en mesurant le temps d'écoulement de béton à travers un entonnoir. [A. El Hilali, 2009]

La procédure d'essai du V-funnel est la suivante: l'entonnoir est rempli de béton jusqu'à arasement. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont nous mesurons le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le béton autoplaçant.



Figure I-1-13: Essai de V-funnel.

I-1-7-3 Essai de la boîte en L: [NF EN 12350-10]

Cet essai permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures. Le schéma de la boîte ainsi que le principe de l'essai sont décrits sur la figure (I-1-13)

La partie verticale de la boîte est remplie de béton que nous laissons reposer une minute. Nous levons la trappe et nous laissons le béton s'écouler à travers le ferrailage. Une fois l'écoulement terminé, nous mesurons les deux hauteurs H_1 et H_2 et nous exprimons le résultat en termes de taux de remplissage H_2/H_1 . Le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur à 0.8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage ou qu'il y a blocage des granulats, c'est le signe de l'apparition de la ségrégation. [F. Hanaa, 2009]



Figure I-1-14 : Essai de la boîte en L.

I-1-7-4 Essai de stabilité aux tamis [NF EN 12350-11]:

La stabilité au tamis est un essai quantitatif développé pour mesurer la ségrégation du béton en phase statique (Figure I-1-14). Il permet de mesurer la masse de laitance passant au tamis de 5 mm, rapportée à la masse de béton versée sur le tamis.

Nous prélevons un échantillon de 10 litres de béton, après 15 minutes d'attente, nous versons sur un tamis d'ouverture 5 mm, une masse de 4.8 kg de béton et nous relevons la masse de l'échantillon ainsi que celle du fond avec la laitance.

Nous calculons le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$P = \frac{P_{\text{Laitance}}}{P_{\text{échantillon}}} \cdot 100$$

- $0\% < P_{\text{LAITANCE}} < 15\%$: stabilité satisfaisante,
- $15\% < P_{\text{LAITANCE}} < 30\%$: stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser sur site),

- $P_{\text{LAITANCE}} > 30\%$: stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).



Figure I-1-15: Essai de stabilité aux tamis.

Les grandeurs spécifiques des caractéristiques d'un BAP à l'état frais sont résumées dans le tableau (I-1-1).

Tableau I-1-1: Spécificités les plus courantes d'un BAP à l'état frais.

Essais	Grandeur spécifique	Valeurs recommandées
Etalement	SF (mm)	$650 \leq SF \leq 750$
Etalement	T_{500} (S)	$2 \leq T_{500} \leq 5$
Stabilité aux tamis	π (%)	$2 \leq \pi \leq 15$
La boîte en L	H_1/H_2 (%)	≥ 80
V funnel	t_v (s)	$8 \leq t_v \leq 12$

- D'autres essais sur les BAP à l'état frais peuvent être conduits : l'essai de la boîte en U qui permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné et la facilité de sa mise en place, le J-Ring test utilisé pour vérifier la capacité d'un béton à s'écouler à travers des armatures. [F. Hanaa, 2009].

I-1-8 Essai complémentaires sur béton frais:

I-1-8-1 Mesure de la teneur en air occlus [NF EN 12350-7]:

Pour la mesure de l'air occlus dans le béton frais (Figure I-1-15), nous utilisons la méthode dite « par pression ». Comme le seul élément compressible dans le béton frais est l'air occlus. Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre selon la norme française, Le pourcentage de l'air occlus dans les bétons autoplaçants n'est pas limité à une valeur fixe, mais, plus il augmente plus il influe négativement sur les performances mécanique de notre béton. [M.I. khalifa, 2009]



Figure I-1-16: Mesure de l'air occlus à l'aide d'un aéromètre.

I-1-8-2 La masse volumique [NF EN 12350-6]:

La masse volumique réelle du béton frais doit être systématiquement mesurée. Cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse volumique théorique. Elle est mesurée par la pesée d'un récipient de 8 litres (fond de l'aéromètre) remplis de béton autoplaçant sans vibrer (Figure I-1-16). Si « m » est la masse du récipient plein de béton (arasé à l'aide d'une règle) et « m₀ » celle du récipient vide, la densité est déduite par l'application de la formule suivante :

$$M_{VR} = (m - m_0) / V \dots\dots\dots [kg/m^3],$$

Où : M_{VR} est la masse volumique réelle du béton frais et V le volume du récipient utilisé (8 litres).



Figure I-1-17 : Mesure de la masse volumique réelle.

I-1-9 Essai de caractérisation des BAP a l'état durci:

I-1-9-1 Résistance mécanique à la compression: [NF EN 196-1].

La connaissance de l'évolution des propriétés mécaniques d'un béton est importante d'un point de vue pratique. La résistance en compression dépend directement de la composition du béton. Le rapport (E/C), la nature des granulats, le volume de pâte, la porosité, la nature du ciment sont les facteurs les plus prépondérants.

1-1-9-2 Module d'élasticité en compression:

Si on se réfère à la formule réglementaire du **module** ($E_{ij} = 11000 f_{CJ}^{1/3}$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré. Or, si ceci est vrai dans certains cas à la précision des mesures près **Persson, Pons** d'autres auteurs comme **Klug et AFGC** indiquent que les modules des BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés. [S.Assié, 2004], or, **Persson et Pons et al. G. Pons, E. Proust, and S. Assié** ont montré que le module est similaire pour les BAP et les BV. De même, **König et al** constatent que les modules des BAP sont très proches de ceux des BV. D'autres auteurs indiquent un module plus faible que ceux des bétons vibrés [F. Hanaa, 2009],

1-1-9-3 Résistance mécanique à la traction:

La résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. On peut noter que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'aurole de transition sont fréquemment utilisées dans la littérature pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus. [F. Hanaa, 2009].

I-1-10 LES FILLERS CALCAIRES

I-1-10-1 Introduction:

Un BAP doit contenir un certain volume de fines (*les fumées de silice, les laitiers de haut-fourneau, cendres volantes, fillers calcaires et siliceux*). Ce sont des produits finement divisés utilisés comme des correcteurs granulométriques, en particulier pour assurer sa stabilité à l'état frais, ces additions peuvent être mélangées au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajoutées directement au malaxeur à béton, et elles sont de plus en plus souvent utilisées par les producteurs de bétons, Puisqu'il s'agit généralement de sous-produits industriels, leur prise en compte revêt un intérêt particulier sur le plan économique (réduction du coût des matières premières "ciment") et écologique (réduction des émissions de CO₂ et de la consommation de ressources non renouvelables).

Les fillers calcaire sont utilisés depuis l'antiquité dans le domaine de la construction, ils sont utilisés dans les mortiers, les colles, les enduits de façade et se substituent au ciment dans les bétons hydrauliques, et apportent une meilleure résistance à court terme en favorisant leur fluidité dans la mise en œuvre.

I-1-10-2 Définition :

Un filler calcaire est une fine minérale obtenue par broyage d'une roche dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 μm , il permet de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats), se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

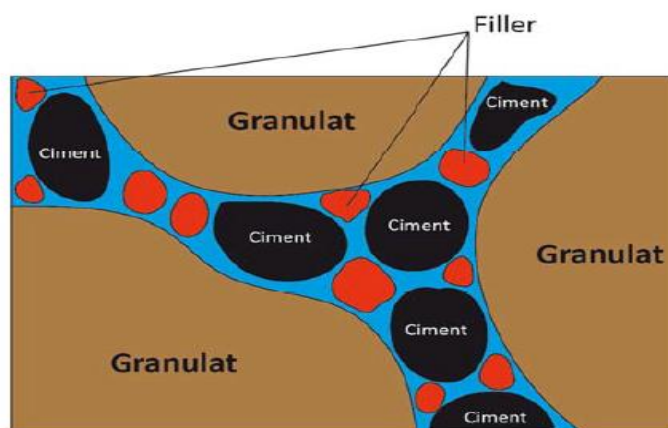


Figure I-1-18 : Illustration de l'effet de fillers.

I-1-10-3 Avantages:

a) Avantages techniques : l'incorporation de fillers calcaire dans un mélange de béton permet d'améliorer:

- la maniabilité et de réduire le besoin en eau.
- la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.
- la résistance à la fissuration parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés.

Et de diminuer :

- la porosité du béton durcis.
- le dosage en ciment pour une résistance donnée.
- le ressuyage.

b) Avantages économiques : comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton par le coût du combustible.

c) Avantages écologiques :

- Diminution de l'émission du CO_2 par l'industrie cimentière. (L'industrie cimentière est responsable de 5 à 7% des émissions de CO_2 liées à l'activité humaine sur la planète à cause de l'extraction des minéraux, du procédé de fabrication du clinker).
- Elimination des sous-produits de la nature.

I-1-10-4 Influence des fillers calcaires sur les propriétés des bétons:

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

a) Information de la littérature: Du fait de sa grande utilisation dans l'industrie, de nombreuses études traitent des bétons autoplaçants incorporant des fillers calcaires dans leurs formulations focalisées majoritairement sur l'étude des propriétés du produit fini, elles négligent généralement les propriétés des fillers et leurs influences sur les propriétés des BAP.

A la lecture des articles traitant des propriétés des bétons autoplaçants aux différents états (frais, durci), il ressort un manque d'information sur les propriétés des fillers calcaires utilisés. En effet, exception faite de quelques études s'intéressant spécifiquement aux propriétés des fillers en relation avec les propriétés dans la matrice cimentaire.

b) Influence du filler sur l'état frais: La finesse d'un filler joue naturellement un grand rôle sur l'écoulement du béton. Nous pouvons ainsi observer une augmentation de la demande en eau avec une augmentation de la surface spécifique BET, Cette demande en eau plus importante induite par une surface spécifique plus importante du filler calcaire va alors influencer sur les propriétés d'écoulements des mélanges cimentaires.

L'utilisation d'un filler permet par définition de combler les vides entre les grains de dimensions plus importantes du ciment. Cela conduit à la réduction de la demande en eau de la pâte de ciment ainsi obtenue (Jones, 2003). Ainsi, l'utilisation d'un filler plus fin (finesse Blaine) et avec une meilleure distribution (déterminée sur la base du coefficient d'uniformité de la courbe granulométrique) permet de réduire la quantité de superplastifiant pour la formulation d'un béton autoplaçant (Hilali). L'arrangement granulaire des particules est, au-delà de la finesse, aussi dicté par la morphologie du filler (Jones, 2003) cité à [P.Diederich, 2010].

c) Influence du filler sur résistance mécanique:

Il est montré que l'utilisation de filler permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges cimentaires (pâte, mortier, béton). Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler et le maximum de résistance est généralement atteint avec un taux de substitution de 10% (Michel, 2007), (Topcu, 2003), (Felekoglu, 2007) cité à [P.Diederich, 2010]. Au-delà, l'effet du filler n'entraîne pas de modification des résistances ou alors entraîne une diminution. Une augmentation de la finesse du filler permet d'améliorer les résistances des mélanges cimentaires sur mortier (Lawrence, 2000) cité à [P.Diederich, 2010].

I-2 LA PATE DE CIMENT, UNE STRUCTURE POREUSE.

I-2-1 Introduction:

Les bétons et mortiers sont des mélanges de granulats, de sable, de ciment et d'eau. Ils sont très utilisés dans la construction.

Les granulats et les sables ont des comportements généralement stables dans le temps. Par conséquent, c'est de la pâte de ciment que va dépendre le comportement d'un béton ou d'un mortier. [CH.Peng, 2009], (La pâte de ciment étant le siège des déformations différées), il nous paraît important, de revenir brièvement sur ses principales caractéristiques.

La connaissance de la structure de la pâte de ciment est essentielle pour comprendre le comportement et les propriétés du béton, la pâte de ciment joue le rôle de « colle », qui confère au matériau béton ses propriétés de rigidité et de résistance. Elle est constituée de différents composés chimiques, dont le gel de C-S-H (silicate de calcium hydraté), à l'origine de son pouvoir adhérent. Elle se compose aussi de pores à différentes échelles, contenant de l'eau et/ou de l'air. L'eau en est un élément essentiel. Elle lui confère en effet ses propriétés de maniabilité (pour le transport et le moulage avant la prise) et de résistance mécanique (après avoir réagi avec le clinker). Mais elle est aussi responsable de ses principaux défauts (augmentation de la porosité et diminution de la résistance mécanique, présence inhérente d'agents agressifs, possibilité de transport d'agents agressifs, retrait et fluage). [F. Benboudjema, 2002]

I-2-2 La microstructure du béton:

La complexité de la microstructure du béton est l'une des causes de son comportement mécanique particulier lorsqu'il est soumis à diverses sollicitations (thermiques, hydriques, mécaniques, chimiques...). Si nous cherchons à comprendre en particulier les mécanismes inhérents au retrait et au fluage du béton, il faut, dans un premier temps, connaître sa structure aux différentes échelles. [A. Makani, 2011]

Nous distinguons trois phases dans le béton : la pâte de ciment, les granulats et l'interface pâte/granat (en incluant la porosité de chacune des phases).

I-2-2-1 La pâte de ciment durci :

Elle représente habituellement 25 à 40 % du volume total du béton, c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau et formant la matrice cimentaire du matériau. Celle-ci joue le rôle de "colle" (lier tous les ingrédients) et confère au matériau béton ses propriétés de rigidité et de résistance.

I-2-2-2 Les granulats:

Les granulats (sable et gravier) occupent 60 à 75 % du volume du béton et constituent le *squelette* du béton, ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau, de l'air. Ils jouent un rôle important dans le comportement du béton. Leur influence est très forte en termes de *performances mécaniques*.

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-2 : LA PATE DE CIMENT, UNE STRUCTURE POREUSE

I-2-2-3 L'interface pâte de ciment/granulat:

La liaison qui s'établit au cours de L'hydratation entre la pâte de ciment et les granulats se traduit par une zone de pâte particulière appelée "auréole de transition" ou interface pâte/granulats [C. De sa, 2007]

I-2-3 Généralités sur le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre très fine. La réaction d'hydratation est un phénomène complexe, déclenché au contact entre l'eau et les particules de ciment. C'est une réaction exothermique avec des conséquences importantes sur les propriétés futures du matériau durcissant. La formation des nouveaux produits, le passage d'un état liquide à un état solide, l'évolution de la porosité sont des transformations intenses et rapides qui engendrent l'apparition de plusieurs phénomènes au sein du matériau.

I-2-3-1 Fabrication du ciment:

Le ciment dont les constituants sont hydrauliques, résulte du broyage fin de clinker et d'une petite quantité de sulfate de calcium (environ 5 %) comme régulateur de prise.

Le clinker qui est le principal composant du ciment est obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire (80%) et d'argile (20%). Le calcaire apporte la chaux (CaO) tandis que l'argile apporte la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃).

La cuisson s'opère dans un four rotatif et doit atteindre une température précise (1450°C) pour que certaines phases cristallines se forment (C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF). Le C₃S est le principal responsable de la prise du ciment.

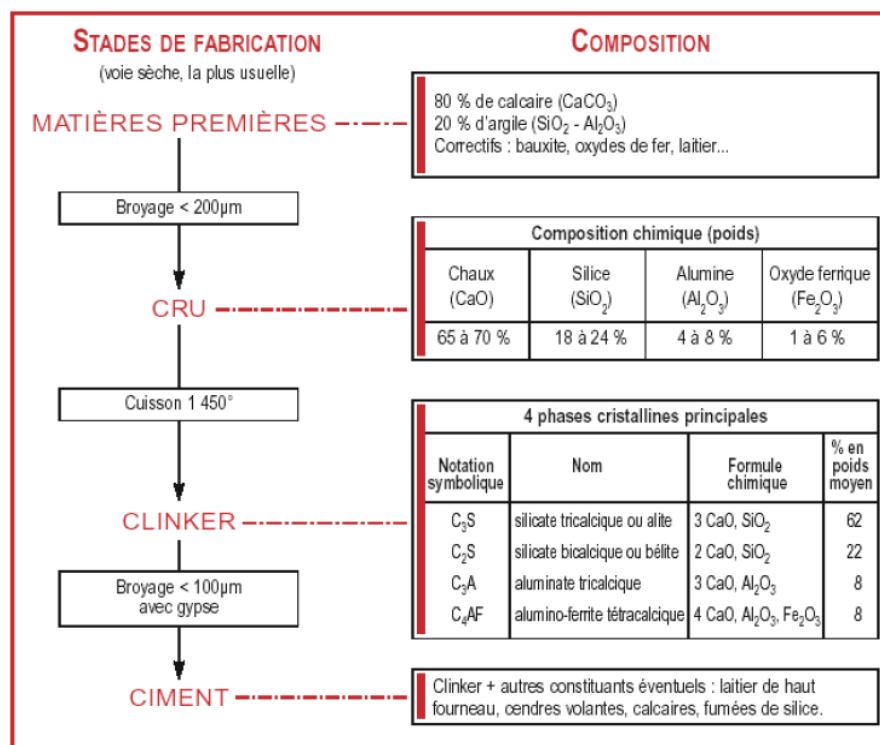


Figure I-2-1: Schéma du Procédé technologique de fabrication du ciment [M.Benia, 2006],

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-2 : LA PATE DE CIMENT, UNE STRUCTURE POREUSE

I-2-3-2 La composition chimique et minéralogique:

Les composés formant le ciment anhydre sont répertoriés dans le Tableau (I-2-1) où figurent leur composition chimique, leur proportion massique obtenue par analyse chimique et également leur notation abrégée dans la nomenclature des cimentiers, nomenclature qui sera utilisée dans la suite. [N.Hyvert,2009]

Tableau I-2-1: Matières premières et principaux constituants du ciment anhydre.

Nom du composé	Formule chimique	Abréviation	Proportion massique (%)
Eléments de base			
Alumine	Al ₂ O ₃	A	2-9
Oxyde de calcium	CaO	C	62-67
Oxyde ferrique	Fe ₂ O ₃	F	1-5
Eau	H ₂ O	H	
Oxyde de potassium	K ₂ O	K	0.6
Silice	SiO ₂	<u>S</u>	19-25
Trioxyde de soufre	SO ₃	<u>S</u>	1-3
Oxyde de Magnésium	MgO	M	0-3
Oxyde de sodium	Na ₂ O	N	0.2
Composants principaux du clinker			
Silicate tricalcique (Alite)	3CaO.SiO ₂	(C ₃ S)	50-70
Silicate bicalcique (Bélite)	2CaO.SiO ₂	(C ₂ S)	15-30
Aluminate tricalcique (Célite)	3CaO.Al ₂ O ₃	(C ₃ A)	5-10
Aluminoferrite tétracalcique (Ferrite)	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	(C ₄ AF)	5-15
Gypse			
Gypse (Sulfate de calcium)	CaSO ₄ .2H ₂ O	C \bar{S} H ₂	2 -5

Une micrographie de clinker d'un ciment Portland avec les différentes phases qui le composent est présentée à la Figure I-2-2.

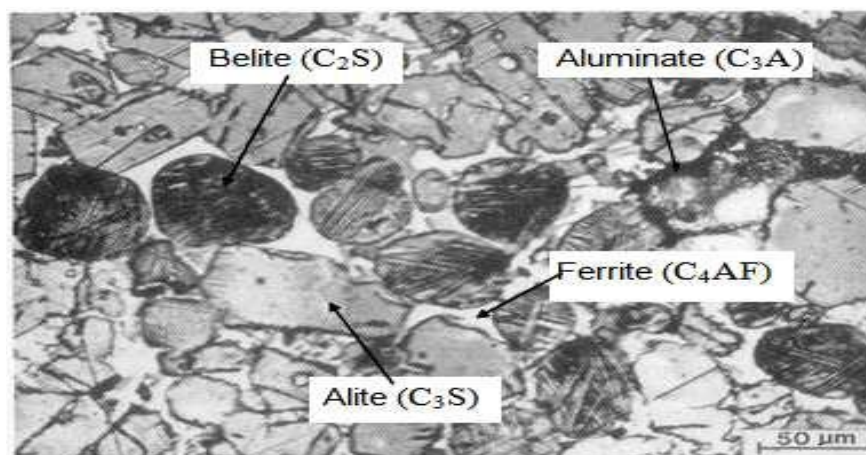


Figure I-2-2 : Micrographie en lumière réfléchie d'une section polie de clinker d'un ciment Portland (Taylor, 1997) cité à [M.Bourissai, 2010],

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-2 : LA PATE DE CIMENT, UNE STRUCTURE POREUSE

Pour mieux comprendre les propriétés du ciment portland, il est intéressant d'étudier comment réagit en présence d'eau chacun des constituants anhydres du ciment pris séparément, ce qui est présenté dans le tableau suivant:

Tableau I-2-2: Le comportement et le dégagement de chaleur des principaux minéraux du clinker. [C.Defossé,2004]

Constituants	C ₃ S (ALITE)	C ₂ S (BILITE)	C ₃ A(CELITE)	C ₄ AF(FERRITE)
Chaleur dégagée	Moyenne (500 J/gr)	Basse (260 J/gr)	Très élevé (865 J/gr)	Moyenne (418 J/gr)
Vitesse d'hydratation	Rapide (heures)	Lente (jours)	Instantanée	Très rapide (minutes)
Développement de la résistance	Rapide (jours)	Lente (semaine)	Très rapide (1jour)	Très rapide (1jour)
Résistance finale	Forte (Dizaines de N/mm ²)	Probablement forte (Dizaines de N/mm ²)	Faible (Quelques N/mm ²)	Faible (Quelques N/mm ²)
Remarque	Constituant caractéristique des ciments portland	/	Instables à l'eau, nécessite du gypse pour régulariser la prise)	Donne au ciment sa couleur grise

I-2-3-3 Processus d'hydratation du ciment et son mécanisme:

a) Mécanisme d'hydratation: La réaction d'hydratation englobe, en fait, tout un cortège de réactions interdépendantes, et de cinétiques différentes, au cours desquelles les grains de ciment anhydre initiaux sont progressivement dissous, en même temps que se forment de nouvelles entités plus ou moins bien cristallisées ayant incorporé des molécules d'eau, dans leur structure[I.Guénou-Delahaie, 2010].

Le mécanisme de ces réactions est généralement un mécanisme de dissolution/précipitation pour former un matériau cohésif [Michaux *et al*, 1990; Taylor, 1998]. [Seid *et al*], [Jaw *et al*],[Ver *et al*].

Lorsqu'un grain de ciment est dans l'eau, les composés anhydres passent en solution, et comme ils sont beaucoup plus solubles que les produits d'hydratation, ils satureront la solution, ce qui provoque une précipitation des hydrates, ce qui de nouveau provoque un passage des anhydres en solution.

Ce phénomène fait intervenir à la fois :

- Des réactions chimiques exothermiques de ses constituants avec l'eau,
- Des réactions physiques, liées au développement microstructural du béton,

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-2 : LA PATE DE CIMENT, UNE STRUCTURE POREUSE

- Des réactions mécaniques, car les réactions précédentes conduisent à des cinétiques variables et des performances modulées en conséquence. [E. Mbemba, 2005].

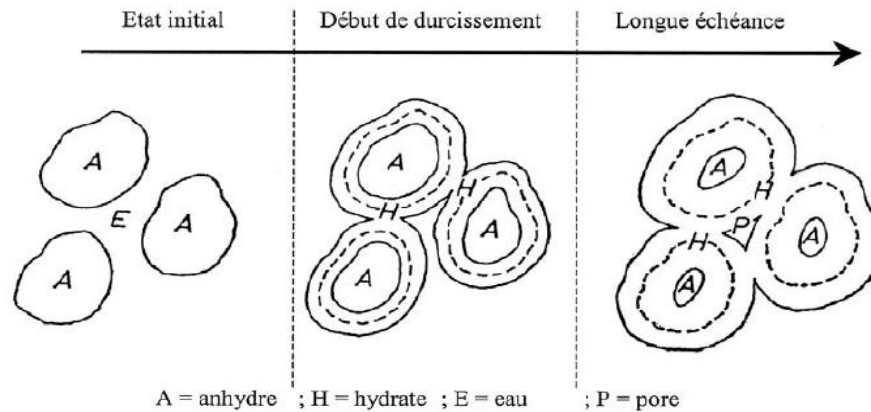


Figure I-2-3: Mécanismes simplifiés d'hydratation des grains du ciment.

[C.Defossé, 2004]

L'ordre de réactivité des composants du ciment est connu : $C_3A \geq C_3S \geq C_4AF \geq C_2S$, qui peut être schématisé sur la Figure I-2-4.

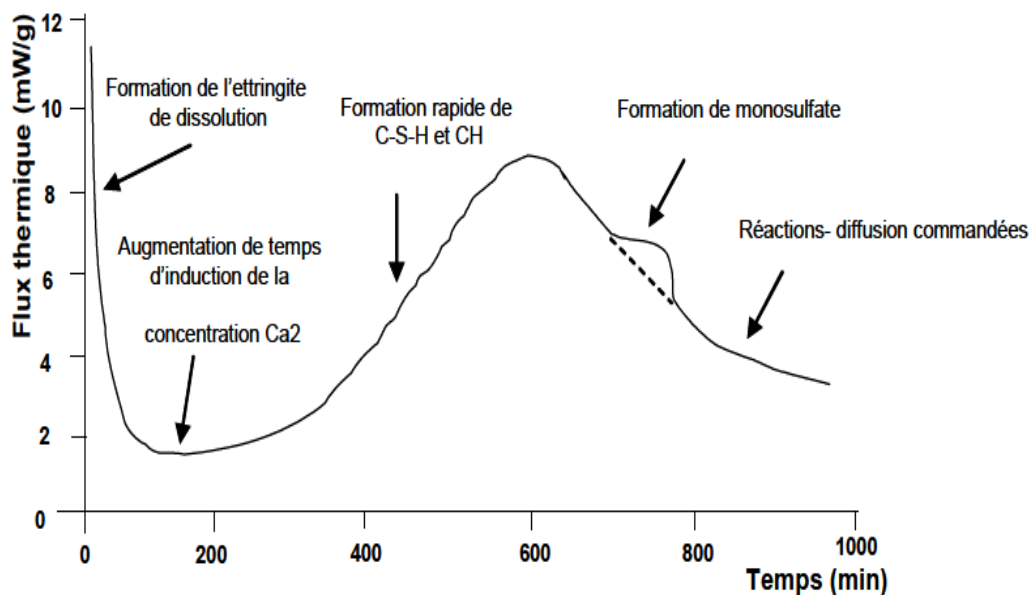


Figure I-2-4 : Représentation schématique de l'hydratation du ciment. (Jaw et al). Cité à [C.Defossé, 2004]

b) Les produits d'hydratation: l'hydratation est une réaction entre l'eau et les constituants du ciment qui donne naissance à des espèces appelées hydrates au sein de la pâte de ciment qui sont principalement : les silicates de calcium hydratés « CSH » et la portlandite « CH ». [S.Bellifa, 2012]

Les principaux hydrates créés lors de la réaction d'hydratation sont les suivants, en accord avec les travaux de recherche réalisés par (Powers et Brownyard, 1947) :

- des silicates de calcium hydratés (notés « CSH »), qui constituent de 50 à 70% des hydrates formés.
- de l'hydroxyde de calcium (ou Portlandite, notée « CH ») qui constitue environ 25% des hydrates.

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-2 : LA PATE DE CIMENT, UNE STRUCTURE POREUSE

- des aluminates de calcium hydratés (plusieurs formes telles que C_4AH_{13} , C_2AH_8 et C_3AH_6). [T.Rougelot, 2008].

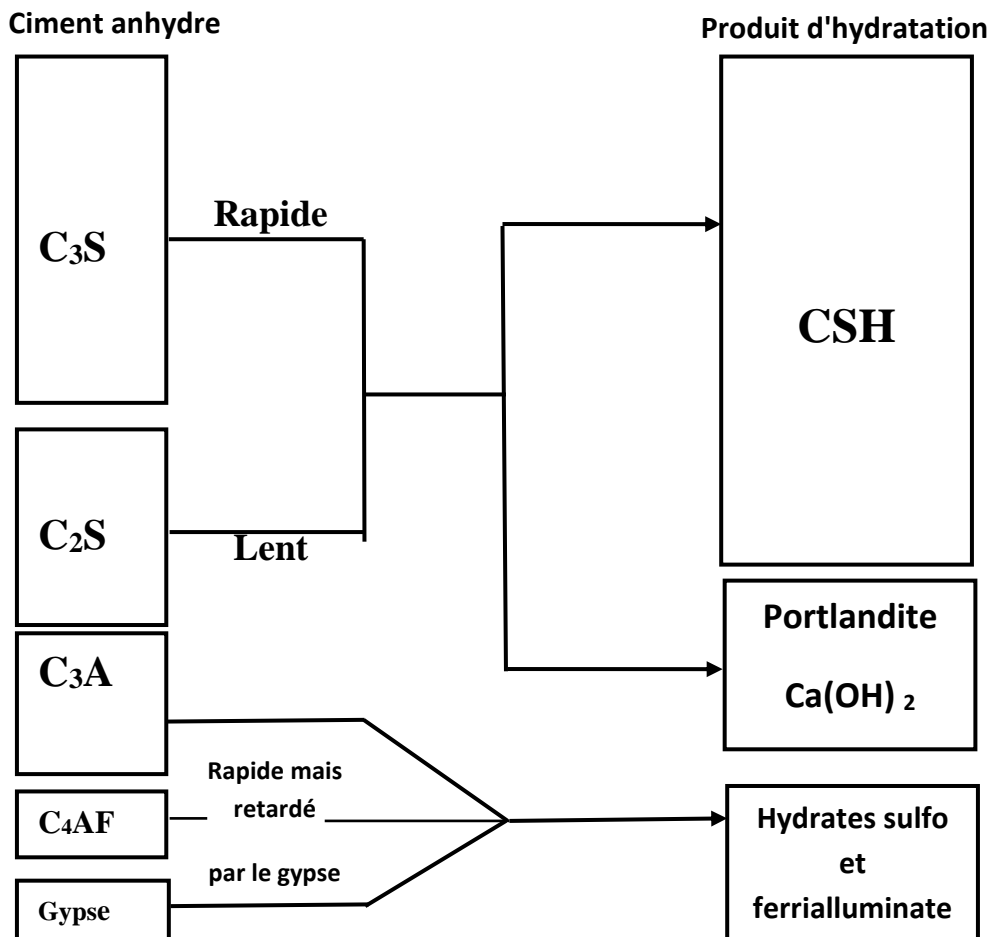


Figure I-2-5 : Représentation schématiquement les constituants anhydres du clinker et des produits d'hydratation.

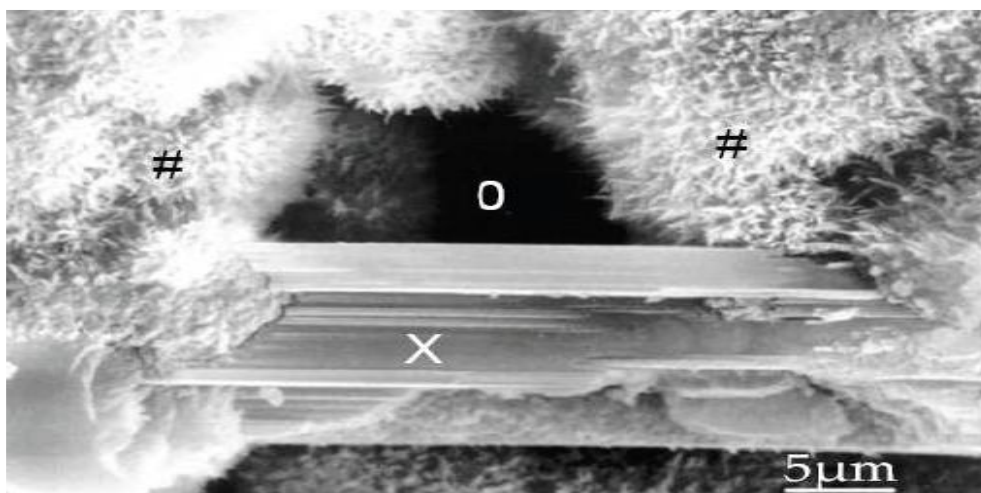


Figure I-2-6: Vue au Microscopie électronique à balayage d'une pâte de ciment : Portlandite (X) entre des C-S-H (#). La porosité capillaire est repérée par (O) (Regourd et Hornain, 1975). Cité à [M.Bourissai, 2010],

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-2 : LA PATE DE CIMENT, UNE STRUCTURE POREUSE

Le (C-S-H) présente à hauteur de 50 à 70 %, en général, dans la pâte de ciment. Ils présentent :

- Une *grande surface spécifique* et une *porosité d'environ 28 %*.
- Une *surface* des C-S-H sont de plus *très attractives*. Elles adhèrent entre elles et avec les autres éléments constitutifs du béton (sable, granulats, portlandite...), ce qui explique le rôle de "colle" du ciment.

De nombreux modèles existent dans la littérature scientifique pour décrire sa la structure et la morphologie de CSH. Le modèle proposé par **Feldman et Sereda** (voir Figure I-2-7) semble le plus à même de justifier la plupart des comportements différés de la pâte de ciment. [C. De sa, 2007]

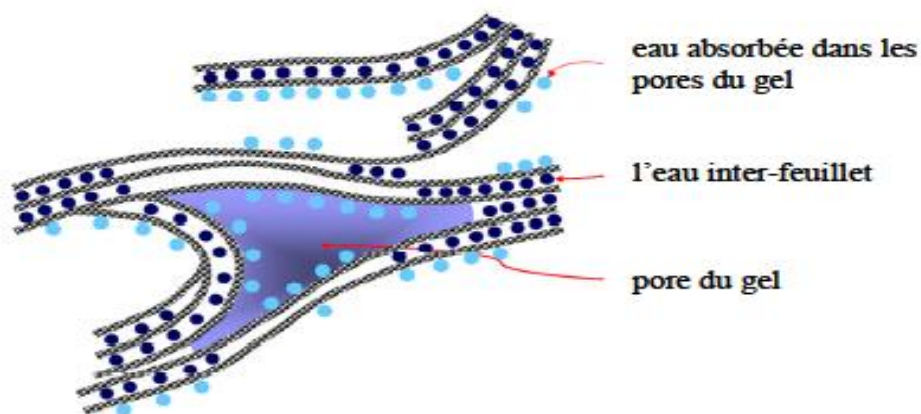


Figure I-2-7: Représentation schématique de la microstructure du gel de C-S-H selon **Feldman et Sereda**. [I.Jaouadi,2008]

Dans ce modèle, les particules de C-S-H se présentent sous la forme de fibres formées de lamelles enroulées sur elles-mêmes. Chaque lamelle est constituée de 2 à 4 feuillets simples.

Ces feuillets peuvent avoir un mouvement relatif entre eux, réversible ou non lors du chargement. Ainsi, la pénétration ou le départ de l'eau des espaces interlamellaires (entre lamelles) et interfoliaires (entre feuillets) est possible. Les mécanismes de retrait et de gonflement sont attribués au mouvement de l'eau dans la structure des C-S-H. [C. De sa, 2007].

I-2-3-4 Les pores dans la pâte de ciment:

La pâte de ciment durcie est un milieu poreux dans lequel coexistent des phases solides, anhydres et hydratées, et une solution interstitielle, ces pores ont des tailles et de formes très variables, distribuées de façon aléatoire dans le matériau. [CH.Peng, 2009]. Le volume total des pores et la distribution en taille des pores varient selon la formulation utilisée et peuvent ainsi former des réseaux de pores interconnectés ou bien des chemins au travers desquels un fluide peut s'écouler. [S.Bellifa, 2012].

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-2 : LA PATE DE CIMENT, UNE STRUCTURE POREUSE

La porosité (fraction volumique des vides) est un paramètre important car elle conditionne en partie la durabilité des bétons et sa capacité à résister à la pénétration d'agents agressifs [Baron et Ollivier 1992].

Au fur et à mesure que l'hydratation progresse, les hydrates remplissent progressivement l'espace initialement rempli d'eau. Cependant, la quantité d'hydrates formés est souvent insuffisante pour remplir entièrement cet espace. Ce volume résiduel non rempli par les hydrates est considéré comme étant celui des *pores capillaires*. Les hydrates résultant des réactions d'hydratation contiennent eux-mêmes des vides, malgré leur densité élevée, que nous l'appelle *pores des hydrates*. [S.Bellifa, 2012]

a) pores capillaires: Espaces intergranulaires initialement occupés par l'eau de gâchage et qui n'ont pas été comblés par les hydrates, [I.GUÉNOT-DELAHAIE, 2010]. Le volume total du mélange ciment-eau ne change pas de manière significative pendant l'hydratation. Par contre, la place occupée au début par l'eau et le ciment est remplacée progressivement par les produits hydrates. L'espace qui n'est pas occupé par les hydrates et le ciment anhydre forme le réseau poreux.

b) pores des hydrates : qui sont des espaces interfoliaires peuvent être qualifiés de « nanopores ». Ils constituent une porosité intrinsèque aux CSH, représentant au minimum 26 à 28 % en volume pour une pâte ordinaire. [I.GUÉNOT-DELAHAIE, 2010]

Les différentes gammes de tailles des pores sont les suivantes :

- ✚ **Micropores** : avec un diamètre $< 26 \text{ \AA}$. Ces pores de très petites tailles n'ont pas une influence négative sur la durabilité du béton, mais peuvent avoir une influence sur le fluage et le retrait.
- ✚ **Mésopores** : ou pores capillaires, avec un diamètre de $(26-500 \text{ \AA})$. ils sont généralement considérés comme les plus importants dans la microstructure du béton du point de vue de la durabilité.
- ✚ **Macropores** : ou pores d'air, avec un diamètre $> 500 \text{ \AA}$. Typiquement, ces pores ont une forme sphérique, et leur présence dans le béton est due à deux causes :
 - Ils se produisent pendant le malaxage.
 - Ils se forment à cause de l'utilisation d'additifs particuliers, qui gardent de l'air pour améliorer certaines caractéristiques (ex. la résistance au gel et au feu).

Tableau I-2-3: Classification des pores en fonction de leurs dimensions et des propriétés qu'ils affectent (Silva et al, 2001) [A. Makani, 2011]

Désignation	Diamètres	Description	Propriétés affectées
Pores du gel	$< 0,5 \text{ nm}$	Espaces inter-couches	Retrait et fluage
	$0,5-2,5 \text{ nm}$	Micropores	Retrait et fluage
	$2,5-10 \text{ nm}$	Mésopores	Retrait
Pores capillaires	$10-50 \text{ nm}$	Capillaires moyens	Résistance, perméabilité, retrait
	$50 \text{ nm}-1 \text{ }\mu\text{m}$	Larges capillaires	Résistance, perméabilité
	$> 1 \text{ }\mu\text{m}$	Larges capillaires et poches d'air	Résistance

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-2 : LA PATE DE CIMENT, UNE STRUCTURE POREUSE

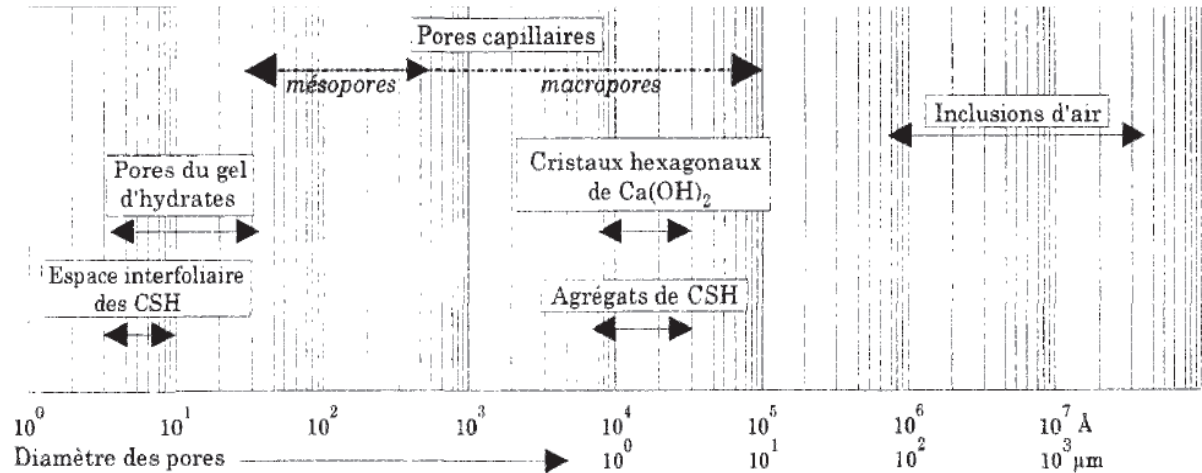


Figure I-2-8 : Répartition schématique des différents ordres de grandeur impliqués dans la structure de la pâte de ciment (adapté de VAN BREUGEL 1991) cité à [L.Guénot-Delahaie, 2010]

I-2-3-5 L'eau dans la pâte de ciment durcie:

La pâte de ciment se compose aussi de pores, contenant de l'eau et/ou de l'air. Outre les hydrates formés, l'eau est un élément essentiel de la pâte de ciment. Elle lui confère en effet ses *propriétés de maniabilité* (pour le transport et le moulage avant la prise) et de *résistance mécanique* (après avoir réagi avec le clinker). L'eau est généralement classifiée selon la nature de sa liaison avec la pâte de ciment hydratée, les différentes classes sont dans l'ordre croissant de liaison:

a) **L'eau chimiquement liée ou eau de constitution:** elle est constituée de l'eau hydroxylique, faisant partie de la structure des hydrates et de l'eau contenue dans les nanopores du gel.

b) **L'eau physiquement liée ou eau adsorbée:** c'est l'eau adsorbée en couche moléculaire sur la surface solide des pores, sous l'action des forces de Van der Waals et des liaisons hydrogènes.

c) **L'eau de capillarité ou eau libre:** contenue dans les espaces intergranulaires (la porosité capillaire). [C. De sa, 2007]

CHAPITRE I-3 : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE
"RETRAIT ET FLUAGE" DES BAP.

I-3-1 Introduction :

Le béton est un matériau qui évolue dans le temps, il est très complexe, la connaissance de son comportement revêt donc un grand intérêt industriel. Ce comportement est très complexe, car il est à la fois hétérogène (mortier et granulats) et triphasique (solide, liquide, gaz).

Les deux principaux mécanismes différés de **fluage** et de **retrait**, modifient l'état du matériau (variation de volume, de déformation ou de contrainte) dans un laps de temps (quelques minutes à quelques années) sous sollicitations (chargement mécanique, hydrique, etc.). L'hétérogénéité ainsi que les propriétés mécaniques et physiques du béton rendent possibles ces comportements différés qui dépendent principalement de la présence de l'eau au sein du béton. [A.Chabane, 2012] Une analyse déformationnelle complète du béton comprend quatre types de déformation, toutes sensiblement du même ordre de grandeur :

- La déformation de retrait attribuable à la dessiccation du matériau,
- La déformation thermique due à une variation de température,
- La déformation élastique instantanée sous l'action d'une charge,
- La déformation différée de fluage sous l'action d'une charge maintenue dans le temps. [L.Granger, 2010]

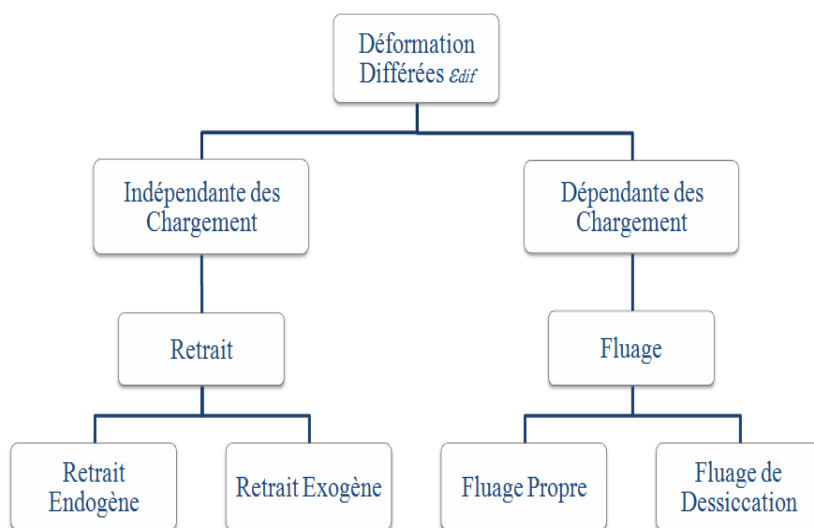


Figure I-3-1: Description phénoménologique des changements de volume.

Ainsi, pour calculer la déformation totale ϵ_{totale} , nous pouvons écrire :

$$\epsilon_{\text{totale}} = \epsilon_{\text{élastique}} + \epsilon_{\text{ret.thermique}} + \epsilon_{\text{ret.endogène}} + \epsilon_{\text{ret.de dessiccation}} + \epsilon_{\text{fl.propre}} + \epsilon_{\text{fl.de dessiccation}} \dots\dots\dots(1)$$

I-3-2 Retrait:

I-3-2-1 Historique:

Le phénomène de retrait a été observé dès les premières utilisations du ciment pour produire du béton. Il a fait l'objet depuis 1935, et surtout après la 2^{ème} guerre mondiale, de nombreuses recherches se poursuivent jusqu'à présent en raison de sa complexité [M. Venuat, 1992],

En outre, le processus de séchage est un phénomène très lent. Les ruptures, ces dernières années, d'anciennes tours en maçonnerie (comme la tour municipale de Pavie en Italie en 1989), après des centaines d'années d'existence, semblent s'expliquer à travers l'interaction complexe entre les phénomènes de séchage, de retrait, de fluage et les effets d'échelle (Bažant et Ferretti 2001) cité à [F. Benboudjema, 2002]

Pour l'ingénieur, le retrait est une déformation différée se produisant en l'absence de charge. Il croît avec le temps pour tendre, après quelques années, vers une limite qui dépend notamment de la composition du béton. Des dosages en ciment et en eau, de l'épaisseur des pièces et de l'humidité relative de l'atmosphère environnante. [Ir c. Ployaert, 2010].

Le phénomène de retrait est un facteur très important dans la pratique, car il entraîne souvent l'apparition de fissures qui peuvent nuire à la durabilité du béton. Dans ce contexte, la fissuration au jeune âge favorise le transport d'agents agressifs au sein de l'ouvrage.

I-3-2-2 Définition:

La pâte de ciment (donc le béton) manifeste des variations dimensionnelles en l'absence de chargement, ces variations sont surtout en relation avec la réduction de volume liée au départ ou à la consommation d'eau au sein du béton (figure I-3-2 (b)). Par opposition, un gonflement (**wetting**) s'observe par immersion de l'éprouvette (ou lors de conditions hygrométriques saturées) (figure I-3-2 (a)) [A.M.NEVILLE, 1983].

La déformation du retrait du béton a trois origines principales :

- L'autodessiccation,
- L'exothermie de la réaction d'hydratation,
- Le séchage du béton. [L.Granger, 2010].

Dans le langage courant, le mot retrait est associé à un phénomène simple qui correspond à la contraction volumétrique observable sur un béton durci qui sèche. Cependant le retrait est loin d'être un phénomène aussi simple. En fait, selon les circonstances, jusqu'à cinq types de retrait peuvent se développer dans un béton sont :

- Le retrait chimique,
- Le retrait thermique,
- Le retrait plastique,
- Le retrait de carbonatation,
- Le retrait de séchage. [V. Seigneur, 2000]

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-3 : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DES BAP
« RETRAIT ET FLUAGE »

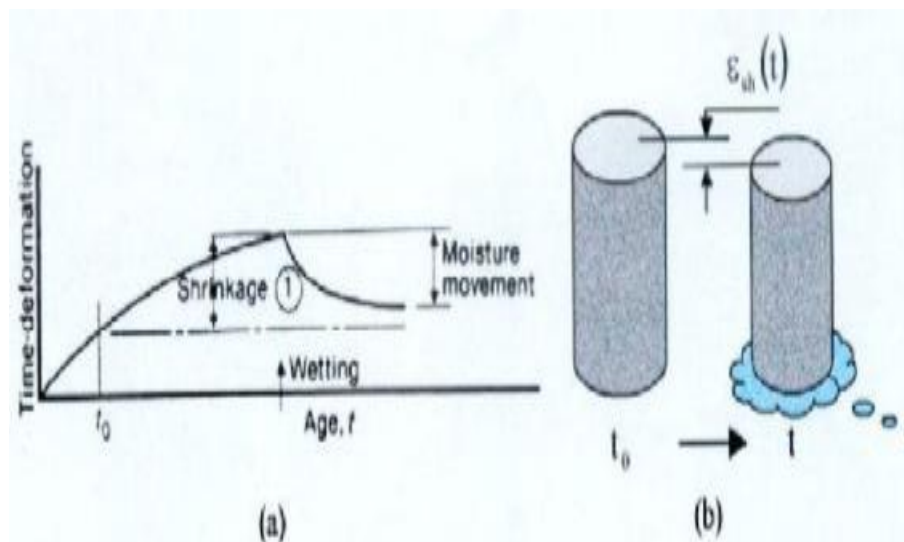


Figure I-3-2: (a) Déformation différée de retrait d'un spécimen non chargé : illustration de la cinétique de retrait (*shrinkage*) et, du gonflement (*wetting*) par variation – (b) Variation volumique d'une éprouvette de béton au retrait. [A.M. NEVILLE, 1983]

I-3-2-3 Les types de retrait :

Nous distinguons deux types de retrait suivant le mode de conservation du béton. Nous parlons ainsi de retrait endogène ou d'autodessiccation lorsqu'il n'y a pas d'échange hydrique avec le milieu extérieur. Lorsque les échanges hydriques sont permis, le retrait est dit de dessiccation ou de séchage.

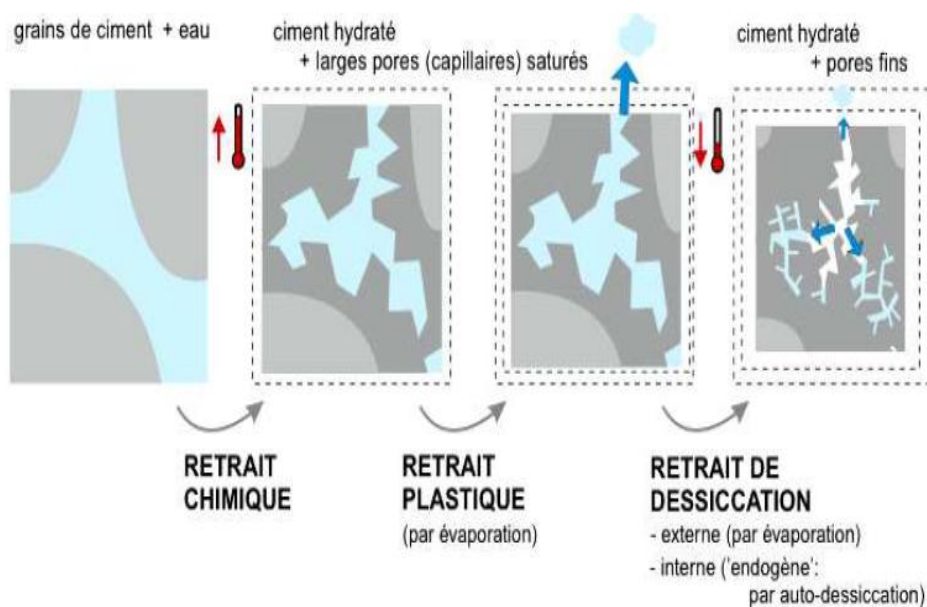


Figure I-3-3 : Les différents types de retrait du béton. [Dr. Ir. P. Boeraeve, 2010]

a) Variations volumiques dues à l'hydratation "retrait endogène" :

Lorsqu'un échantillon est protégé de toute dessiccation, nous parlons alors de conditions endogènes, le retrait endogène trouve son origine dans une autodessiccation

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-3 : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DES BAP
« RETRAIT ET FLUAGE »

c'est-à-dire une variation volumique due à l'hydratation du ciment, il se produit dans des conditions isothermes et sans échange hydrique entre l'éprouvette et le milieu extérieur. [J. Monge, 2007]

Le retrait endogène est un des processus intrinsèques du béton car il ne dépend que des propriétés du matériau [P. Acker & Ulm, 2001]

i) La contraction Le Chatelier : La contraction de Le Chatelier ou retrait d'hydratation ou aussi retrait chimique (à ne pas confondre avec le retrait hydraulique, ni avec le retrait de dessiccation) est une contraction d'origine chimique qui a lieu pendant les premières heures de l'hydratation (depuis le contact eau-ciment jusqu'au début de la prise). [W. Ladaoui, 2010]

C'est au début du siècle dernier, qu'Henri Le Chatelier mit en évidence la célèbre contraction qui porte désormais son nom. Lors de la réaction d'hydratation du ciment, le volume des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes de ciment anhydre et de l'eau consommée. Cette diminution globale est de l'ordre de 8 à 10 % pour une pâte de ciment. [P. ACKER, 1988]

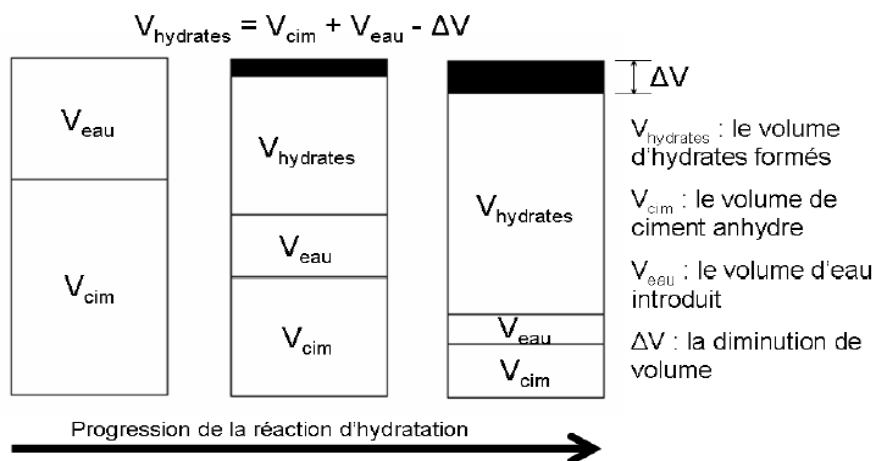


Figure I-3-4: Schéma illustrant la contraction Le Chatelier. [J. Monge, 2007],

ii) Le retrait thermique : Le retrait thermique est dû à un gradient thermique important entre le cœur d'une structure, où règne une température élevée du fait de l'exothermie de la réaction d'hydratation et la peau exposée à l'air ambiant. Par conséquent, il est d'autant plus important que la pièce (pile de pont, barrage, bloc de fondation etc.) est massive. La réaction d'hydratation exothermique est la cause inévitable de montée en température allant jusqu'à 80 C° au cœur d'une pièce en béton. Pour les structures en couches minces, ce type de retrait est négligeable devant ceux présentés par la suite. [J. Monge, 2007].

iii) Mécanismes du retrait endogène : Selon Hua et coll, l'autodessiccation est une conséquence de l'hydratation qui se produit seulement à haute humidité relative (80-100%). Selon les auteurs la variation des dépressions capillaires joue un rôle dominant

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-3 : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DES BAP
« RETRAIT ET FLUAGE »

sur l'autodessiccation, du fait que les dépressions capillaires peuvent varier de 0 à 30 MPa dans cette étendue d'humidité relative. Un calcul élémentaire avec les lois de **Kelvin** et **Laplace** montre qu'à 90 % d'humidité relative, dans un pore de rayon de (100 Å), la dépression capillaire atteint une valeur de l'ordre de 14 MPa. Par contre la variation des tensions superficielles et la variation des pressions de disjonction ont des effets négligeables sur le retrait endogène (**Hua et coll**) cité à [**I.Jaouadi, 2008**]. Selon **Wittmann ; Ferraris & Wittmann**, les variations dimensionnelles qui se manifestent en dessous de 50 % HR peuvent être attribuées aux variations de tensions superficielles. Tandis qu'au-delà de 50 %, la variation des pressions de disjonction serait le mécanisme dominant.

Mécanisme de variation de la dépression capillaire: Ce mécanisme est relié à l'autodessiccation dans les pores capillaires. Durant l'autodessiccation, des ménisques se forment à l'interface des phases (liquide/vapeur) d'eau dans les pores capillaires (voir Figure I-3-5), en créant une tension dans le liquide qui résulte en une contraction des pores. Ce mécanisme est décrit par deux lois : (1) la loi de Kelvin et (2) la loi de Laplace qui décrivent l'équilibre du ménisque sous différentes pressions de part et d'autre, et l'équilibre hygrométrique entre le liquide et la vapeur d'eau.

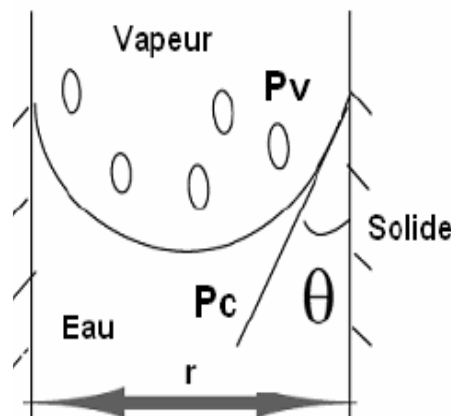


Figure I-3-5: Interface liquide/vapeur dans un pore non saturé

$$P_v - P_c = \frac{2\sigma}{r} \cos\theta \quad (\text{Laplace}) \dots\dots\dots(2)$$

$$P_c - P_v = \frac{RT}{MV} \ln(h) \quad (\text{Kelvin}) \dots\dots\dots(3)$$

$$-\frac{2\sigma}{r} \cos\theta = \frac{RT}{MV} \ln(h) \quad (\text{Kelvin - Laplace}) \dots\dots(4)$$

Avec :

- P_c : Pression dans l'eau,
- P_v : Pression dans la vapeur d'eau, souvent prise égale à zéro,
- r : Rayon du pore avec ménisque,
- θ : Angle de mouillage,
- σ : Tension de surface à l'interface liquide/vapeur d'eau,

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-3 : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DES BAP
« RETRAIT ET FLUAGE »

- V: Volume de l'eau,
- M: Masse molaire de l'eau,
- R: Constante des gaz parfaits,
- T: Température et h: humidité relative.

iv) Facteurs influençant le retrait endogène:

De nombreux paramètres peuvent influencer l'autodessiccation et donc le retrait endogène à savoir : le rapport E/C, la nature du ciment, la présence d'ajouts minéraux, les granulats et les adjuvants.

➤ **Rapport E/C:**

Le rapport E/C est le paramètre majeur influençant le retrait d'autodessiccation. En effet, plus le rapport E/C est faible, plus l'amplitude du retrait endogène est grande et plus le retrait commence au jeune âge (Figure I-3-6) (Charron 2001, Baroghel 2001, Tazawa 1995, Justnes 1996, Zhang 2003) cité à [I.Jaouadi, 2008].

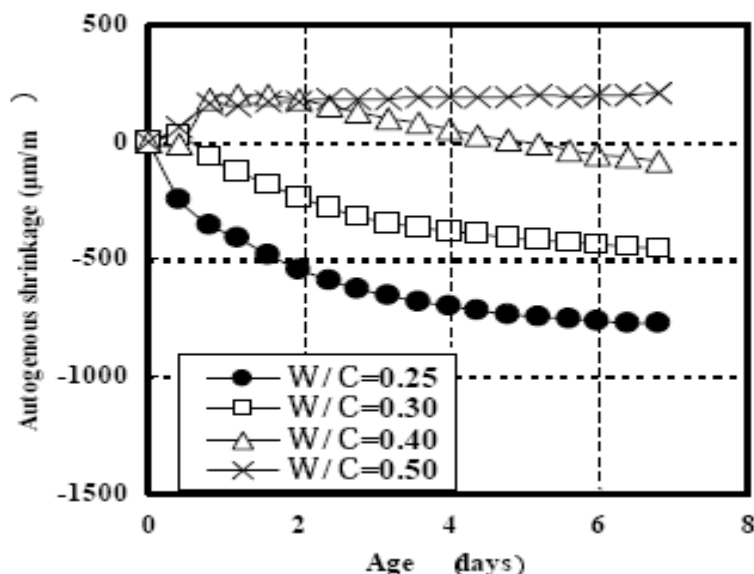


Figure I-3-6 : Influence du rapport E/C sur le retrait endogène de la pâte de ciment, (Nawa,2004). [I.Jaouadi, 2008].

➤ **Composition et finesse du ciment:**

La composition du ciment influence l'évolution du retrait endogène, à la fois, par sa finesse et sa composition minérale et son dosage. Un ciment plus fin accélère le développement du retrait endogène (Figure 2.13) (Tazawa 1995 ; Jensen 2000) cité à [I.Jaouadi, 2008].

Concernant sa composition, Baroghel (2001) et Tazawa (1995) cité à [I.Jaouadi, 2008], montrent que le retrait endogène dépend principalement de la teneur du ciment en aluminat C_3A : il est d'autant plus grand que la teneur en C_3A est importante. Cependant, Jensen (2000) a observé que l'augmentation de la teneur en C_3A mène à une diminution du retrait endogène. Ces divergences dans les résultats montrent que

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-3 : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DES BAP
« RETRAIT ET FLUAGE »

l'influence de la composition minéralogique du ciment sur le retrait endogène n'est pas encore bien élucidée.

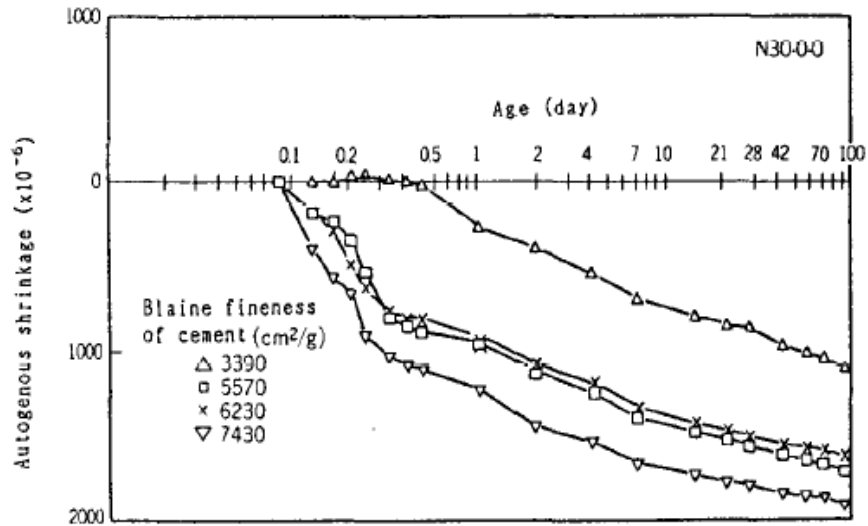


Figure I-3-7: Influence de la finesse du ciment Portland sur le retrait endogène. (Tazawa 1995). [I.Jaouadi, 2008]

➤ **Dosage du ciment:**

L'augmentation de la quantité de ciment par m³ signifie une augmentation de la quantité de pâte et de la chaleur produite lors de l'hydratation. Cette augmentation de la chaleur produite entraîne une montée en température plus importante lors de l'hydratation et cette activation thermique est à l'origine d'une augmentation de la cinétique d'hydratation. Tout comme pour la finesse et la composition du ciment, une augmentation de la température d'hydratation accélère la réaction d'hydratation et peut provoquer une augmentation du retrait endogène.

➤ **Adjuvant:**

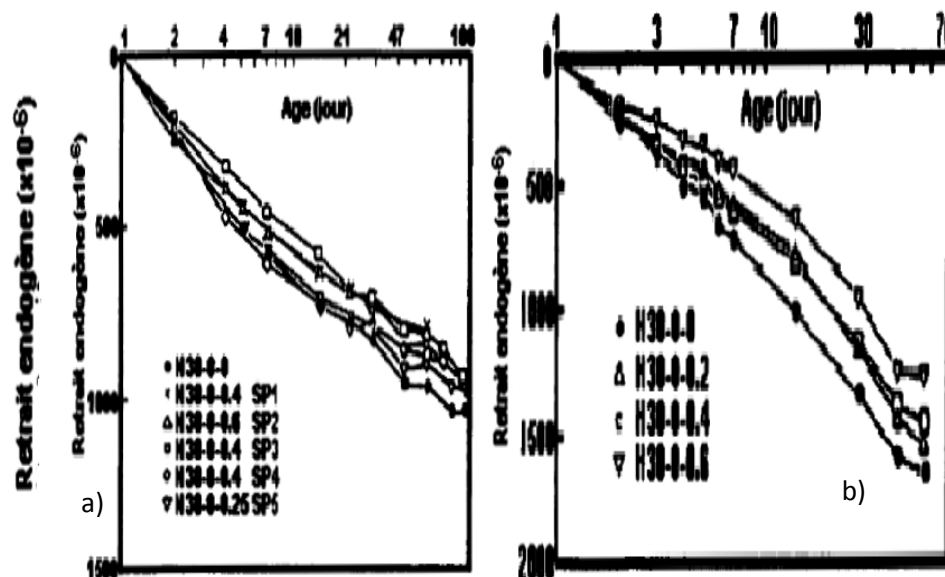
Pour un même E/C, le retrait endogène est légèrement réduit lorsqu'un superplastifiant est ajouté au béton. Cet effet peut s'expliquer par la faible influence qu'ont les superplastifiants sur la cinétique de l'hydratation ainsi que sur la tension superficielle. Les essais démontrent que le type et le dosage utilisé influencent très peu le développement du retrait endogène. (E. Tazawa, S. Miyazawa, and T. Kasai). Les graphiques a et b de la figure (I-3-8) illustrent respectivement l'effet du type de superplastifiants et l'effet du dosage en superplastifiant sur le développement du retrait endogène. [V. Seigneur, 2000]

➤ **Granulats:**

Le retrait endogène se produit dans la pâte de ciment, par conséquent le développement de ce retrait est **moins** important dans le béton que dans le mortier et que dans une pâte de ciment à cause de la présence des granulats (sable et/ou pierre).

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-3 : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DES BAP
« RETRAIT ET FLUAGE »

Le retrait endogène diminue avec l'augmentation de la concentration du volume de granulats et l'effet des granulats peut s'expliquer par la diminution de la quantité de pâte de ciment. [V. Seigneur, 2000]



➤ **Dimensions de l'élément de béton (effet d'échelle):**

Les dimensions de l'élément de béton ne sont pas sans effet sur le développement du retrait endogène. En fait, plusieurs phénomènes se développent différemment dans les éléments de béton de grande taille comparativement à ceux de petites dimensions. Entre autres, dans les gros éléments l'élévation de température est plus importante à cause de la dissipation plus lente de la chaleur, ce qui entraîne une accélération de la réaction d'hydratation et par conséquent une accélération du développement du retrait endogène. De plus, dans des éléments de grande dimension l'eau de mûrissement ne peut pénétrer jusqu'au centre de l'élément à cause de la diminution de l'interconnexion des pores, ainsi le développement du retrait endogène n'est pas contrôlé dans la partie intérieure. [V. Seigneur, 2000]

b) Variations volumiques dues à de l'exposition aux conditions extérieures:

Ce type de retrait dépend essentiellement du climat environnant, tel que la température et de l'humidité relative mais aussi de l'épaisseur de l'ouvrage, des échanges thermiques, hydriques se produisent entre celui-ci et le milieu extérieur. Ces échanges sont la cause de variations volumiques conséquentes de l'échantillon provoquant parfois la fissuration à plusieurs échelles (micro ou macro) de l'élément. On distingue le retrait plastique et le retrait de dessiccation (séchage). [J. Monge, 2007],

i) Le retrait plastique :

Le retrait plastique est le premier retrait de dessiccation qui se développe dans le béton encore à l'état plastique c'est-à-dire à la période correspondant au domaine des teneurs en eau pour lesquelles la phase liquide est encore connexe. Il s'achève à la fin de la prise lorsque la pâte devient indéformable. Il est provoqué par une évaporation de l'eau en surface libre du béton frais après sa mise en place. Le retrait plastique peut conduire à la formation de fissures peu profondes et limitées à la face supérieure du béton qui n'atteignent que quelques millimètres ou centimètres de profondeur. Ce type de retrait peut être limité par l'utilisation de coffrages étanches non absorbant ou par la protection de la surface du béton de tout séchage brutal avant la prise. [V. Seigneur, 2000]

Mécanismes à l'origine du retrait plastique: "Le tassement"

Pour illustrer les mécanismes, nous prenons l'exemple d'une pâte de ciment à l'état frais, dont la surface sèche (figure I-3-9 (a)).

Juste après le coulage, les grains de ciment et l'air entraîné sont en suspension dans l'eau. Sous l'effet de la gravité, les particules solides sédimentent, alors que les bulles d'air remontent : la pâte se compacte (figure I-3-9 (b)). Au cours de cette consolidation, l'eau est contrainte de percoler vers la surface. Il se forme alors une couche d'eau, appelée eau de ressuage, schématisée par le trait en pointillés sur la (figure I-3-9 (c)).

Les hydrates, en noir sur les figures, sont produits en périphérie des grains de ciment. Leur volume est inférieur à ceux des réactifs (eau + ciment). Il se produit donc une diminution de volume, appelée retrait chimique ou contraction de Le Chatelier.

En plus de la consolidation et du retrait chimique, une troisième composante s'ajoute à la diminution de volume : le départ de l'eau due à l'évaporation. Au total, la contraction provoque un mouvement vers le bas de la surface de la pâte, que nous nommons "tassement".

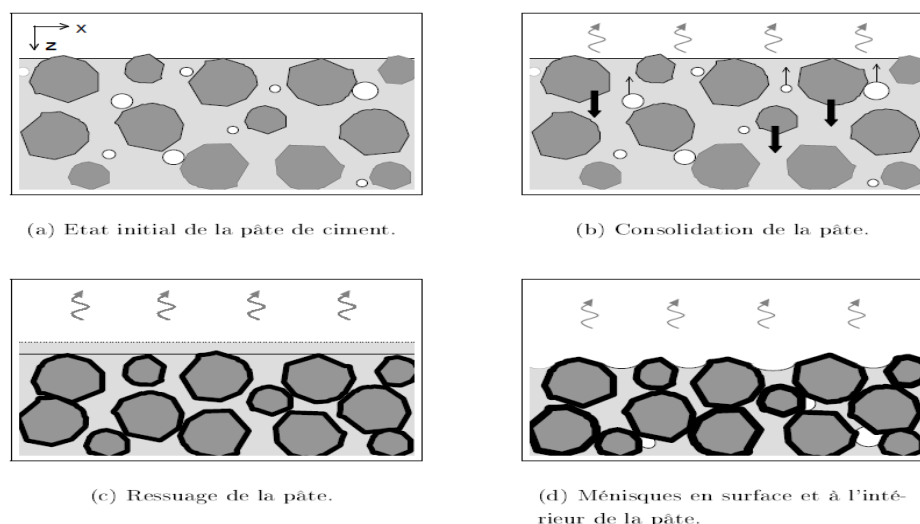


Figure I-3-9 : Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment. [Ph.Turcry, 2004]

ii) Le retrait de dessiccation:

Il est donc entièrement dépendant des conditions en température, vent et humidité relative extérieure [J. Monge, 2007], Ce retrait se produit très lentement et dure plusieurs années. [A. Muttoni, M.F.Ruiz, N. Kostic, 2006]

Le retrait de séchage ou de dessiccation qui se développe à partir de la surface de l'élément de béton durci exposé à l'air ambiant dont le degré hygrométrique est inférieur à celui du réseau capillaire de la pâte de ciment hydraté. Cette situation favorise l'évaporation de l'eau contenue dans les capillaires de la pâte de ciment hydraté à partir de leurs extrémités exposées à l'air plus sec. L'évaporation de l'eau contenue dans le béton entraîne une diminution de la masse de béton et le développement d'un gradient d'humidité dans l'élément de béton. Le retrait de séchage s'arrête lorsque l'équilibre entre l'humidité relative ambiante et celle du béton est atteint ou lorsque les forces qui retiennent l'eau à l'intérieur des petits pores capillaires sont égales aux forces qui causeraient l'évaporation de cette eau. (S.H Kosmatira, W.C Panarese, G.E Allen, et S. Cummin, 1991) cité à [V. Seigneur, 2000]

Mécanismes du retrait de dessiccation:

Le départ de l'eau présente initialement dans les pores du béton induit une déformation du squelette solide. L'origine de cette variation dimensionnelle ne fait pas aujourd'hui l'unanimité de la communauté scientifique (Aïtcin et al. 1998). Néanmoins, les expériences de retrait de dessiccation montrent que la distribution des pores et les caractéristiques du gel C-S-H ont une influence prépondérante sur la déformation de retrait de dessiccation (Wittmann 1982, Young 1988, Neville 2000). Trois principaux modèles microstructuraux proposent un mécanisme pour le retrait de dessiccation : le modèle de Powers (Powers 1968), le modèle de Feldman-Sereda (Feldman et Sereda 1968) et le modèle de Munich (Wittmann 1973). Toutefois, il semble que le retrait de dessiccation ne résulte pas d'un mécanisme unique, mais plutôt de la combinaison de plusieurs mécanismes. [F. Benboudjema, 2002]

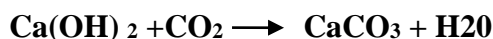
✚ ***La pression capillaire*** : Elle résulte de l'équilibre liquide-vapeur dans la porosité capillaire du béton. La diminution de l'humidité relative au sein du béton (du fait du séchage) induit une diminution de la pression de l'eau liquide, provoquée par la vaporisation de celle-ci. La coexistence des phases liquides (eau) et gazeuses (vapeur d'eau et air sec) entraîne la formation d'un ménisque à l'interface liquide / gaz, et donc l'apparition de tensions capillaires. Elles entraînent alors la contraction du squelette solide et provoque ainsi le retrait de dessiccation ;

✚ ***La pression de disjonction*** : L'eau associée à la pression de disjonction est en équilibre avec l'humidité relative environnante. Une diminution de l'humidité relative entraîne un départ de cette eau. Il se produit alors une diminution de l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée dans la zone d'adsorption empêchée et donc une diminution de la pression de disjonction. Il en résulte alors une déformation du squelette solide qui correspond à la déformation de retrait ;

✚ **La variation de l'énergie surfacique solide** : L'énergie surfacique des particules de gel C-S-H crée des contraintes de traction en surface et des contraintes de compression au sein du solide. Lorsqu'il y a adsorption, les tensions surfaciques diminuent et s'il y a désorption, les contraintes induites augmentent, provoquant une contraction du solide et donc une déformation de retrait.

iii) Retrait de carbonatation :

Le retrait de carbonatation est une contraction volumétrique qui se développe principalement dans les premiers centimètres du béton, puisque c'est à la surface que la concentration de gaz carbonique est plus importante. Lorsque le béton est saturé, la réaction de carbonatation est beaucoup plus lente, car la diffusion du CO₂ dans l'eau est de beaucoup inférieure celle dans l'air. Ce type de retrait est occasionné par la réaction de la pâte de ciment hydraté, plus spécifiquement de la chaux issue de l'hydratation (portlandite), avec le gaz carbonique de l'air dissous dans l'eau pour donner du carbonate de calcium et de l'eau selon la réaction suivante :



Le retrait est occasionné par l'évaporation de cette eau libérée par la réaction de carbonatation. Le retrait de carbonatation se traduit par des fissures peu profondes et principalement limitées aux surfaces exposées du béton. (S. Lapage et G.E Allen) cité à [Seigneur,2000].

Ce retrait est généralement négligeable pour le comportement structurel. [A. Muttoni, M.F.Ruiz, N.Kostic,2006] cité à [N.Tabet, 2012]

iv) Facteurs influençant retrait de dessiccation:

➤ **Rapport (E/C) et la teneur en granulats:**

La figure (I-3-10) donne la variation du retrait de dessiccation en fonction du rapport (eau/ciment) et de la proportion de granulats en volume. Pour une même teneur en granulats, le retrait augmente avec le rapport (eau/ciment). La cinétique et l'amplitude du retrait sont plus importantes avec la diminution de la teneur en granulats. D'autre part, pour un même rapport (eau/ciment), la diminution de la teneur en granulats augmente le retrait, avec une amplitude de plus en plus importante. La figure (I-3-11) présente l'effet du rapport (eau/ciment), de la teneur en eau et en ciment sur le retrait total en dessiccation d'un béton. Pour un rapport (eau/ciment) constant, l'augmentation du dosage en ciment a pour effet un accroissement du retrait, du fait d'une plus grande quantité de pâte de ciment hydraté. Néanmoins, pour un dosage en eau constant, le retrait est diminué avec l'augmentation du dosage en ciment, car le rapport (eau/ciment) est réduit. De plus, le retrait de dessiccation est influencé par les propriétés des granulats et du ciment utilisés. [I. YURTDAS, 2003]

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-3 : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DES BAP
« RETRAIT ET FLUAGE »

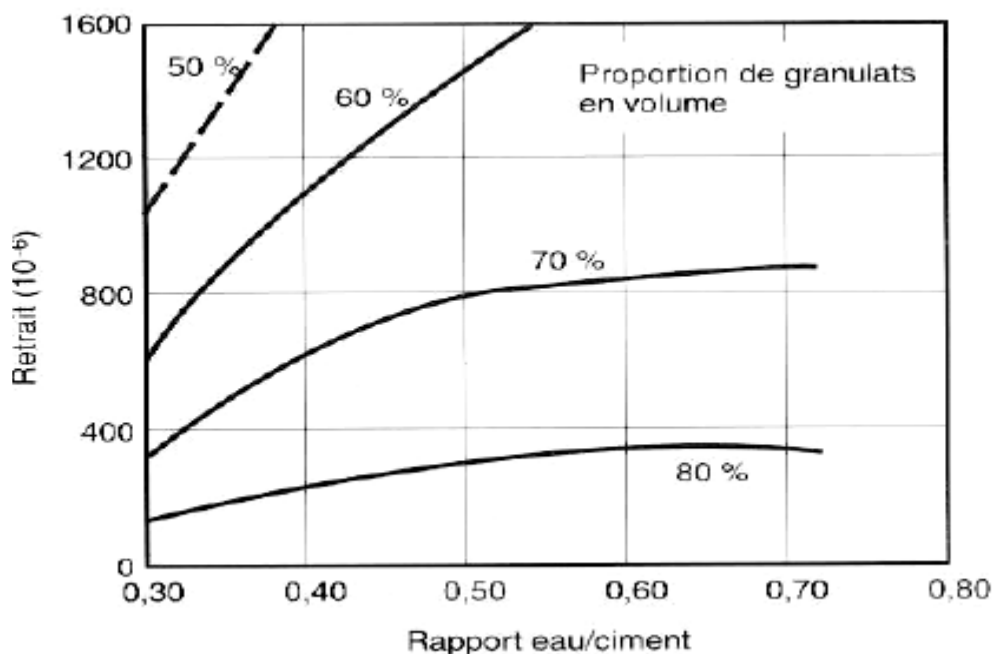


Figure I-3-10 : Influence du rapport (E/C) et de la teneur en granulats sur le retrait des matériaux à matrice cimentaire conservés à HR= 50 % et à T=21 C° pendant 6 mois (Ödman 68). cité à [I. YURTDAS, 2003]

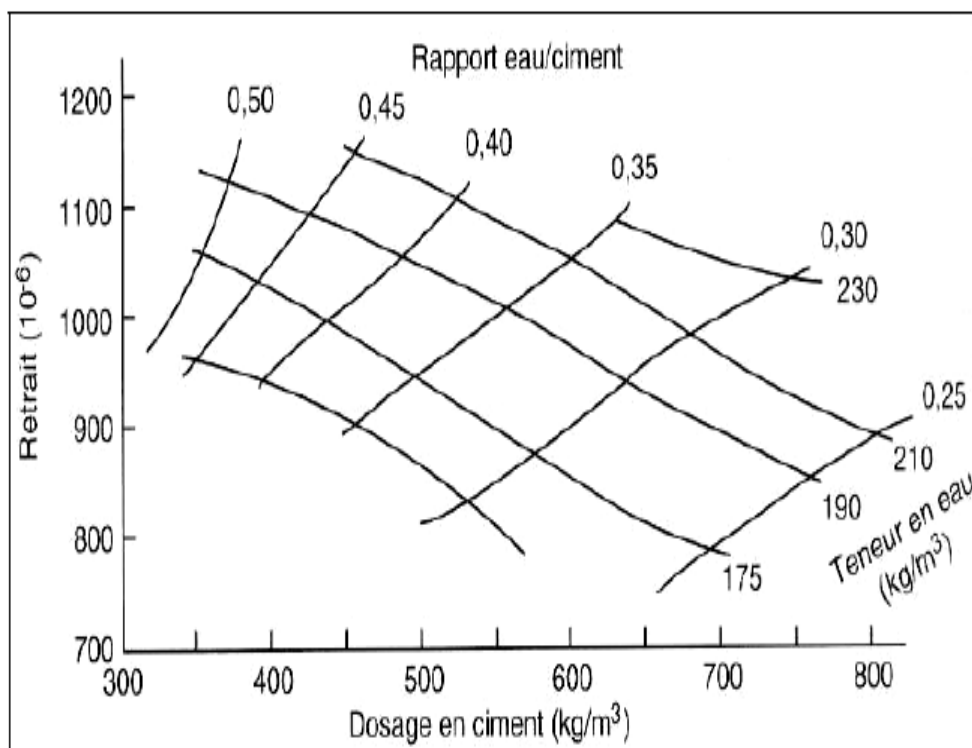


Figure I-3-11 : Variation du retrait en fonction des dosages en ciment et en eau, et du (E/C) d'un béton mûri à l'eau pendant 28 jours puis séché pendant 450 jours (Shoya) cité à [I. YURTDAS, 2003]

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-3 : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DES BAP
« RETRAIT ET FLUAGE »

➤ *Rapport (G/S) et le type de granulat:*

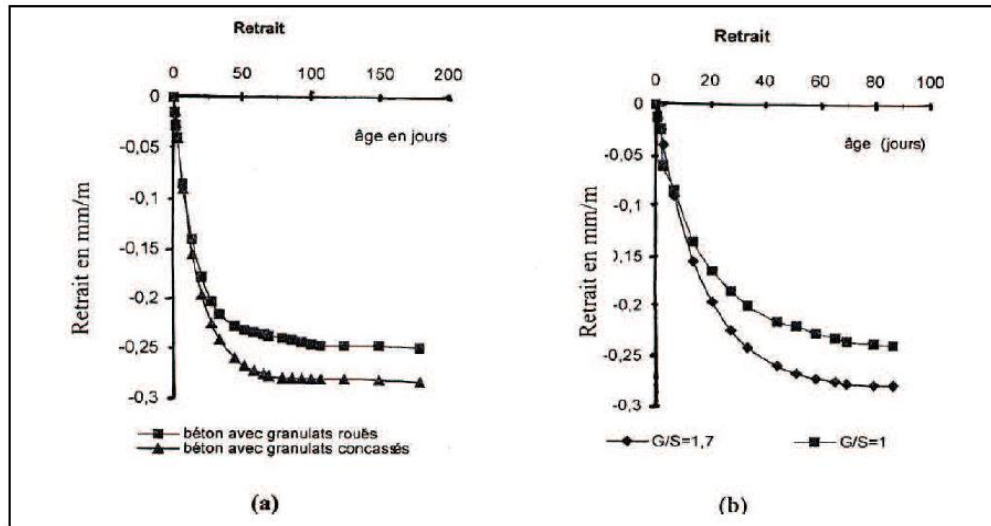


Figure I-3-12: Effet des granulats (types et rapport G/S) sur le retrait. [V. Seigneur,2000]

➤ *L'humidité relative:*

Le retrait est principalement dû à la migration de l'eau de l'intérieur vers l'extérieur. L'humidité relative du milieu joue un rôle important sur l'ampleur du retrait final du béton. Le retrait du béton augmente si sa perte en eau augmente. Cette même figure (I-3-13) illustre aussi que le retrait est plus important en valeur absolue que le gonflement dans l'eau. Le gonflement est 6 fois plus faible que le retrait dans l'air à 70% d'humidité relative et 8 fois plus faible que le retrait dans l'air à 50% d'humidité relative.

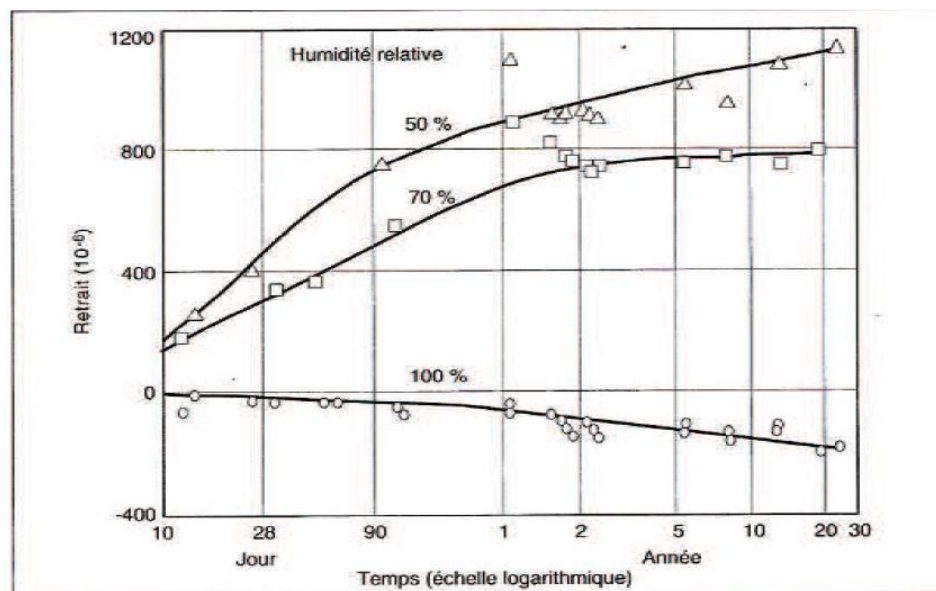


Figure I-3-13 : Relation entre le retrait et le temps pour des bétons conservés à différentes humidités relatives. [L.Bal,2009],

➤ **Période de cure:**

La cure protège le béton frais contre l'évaporation rapide d'eau, et donc favorise l'hydratation du ciment et le développement de la résistance du béton dans le temps. Le retrait du béton augmente lorsque la période de mûrissement diminue (**Baron 1971**).

- L'épaisseur de la pièce,
- La porosité ou la teneur en eau libre du béton,
- Le volume de pâte. [**V. Seigneur, 2000**]

I-3-3 Fluage:

I-3-3-1 Historique

La découverte du fluage en 1910 a été révélée par **Eugène Freyssinet** qui l'observa sur un pont qu'il construisit à Le Veudre sur l'Allier (France) en observant une évolution des déplacements de la structure au cours du temps.

I-3-3-2 Définition:

Le **fluage** est le phénomène physique qui provoque la déformation *irréversible* différée (c'est-à-dire non-instantanée) d'un matériau soumis à une contrainte constante (notée σ_0), inférieure à la limite d'élasticité du matériau, pendant une durée suffisante [**Wikipédia**],

Nous obtenons une déformation totale qui est composée de trois composantes :

1. La déformation instantanée correspondante à la déformation élastique mesurée immédiatement après la mise en charge,
2. Le retrait mesuré depuis le moment de la mise en charge.
3. La déformation de fluage. [**A. Kamen, 2007**].

Une fois le béton est chargé, il subit une déformation élastique récupérable.

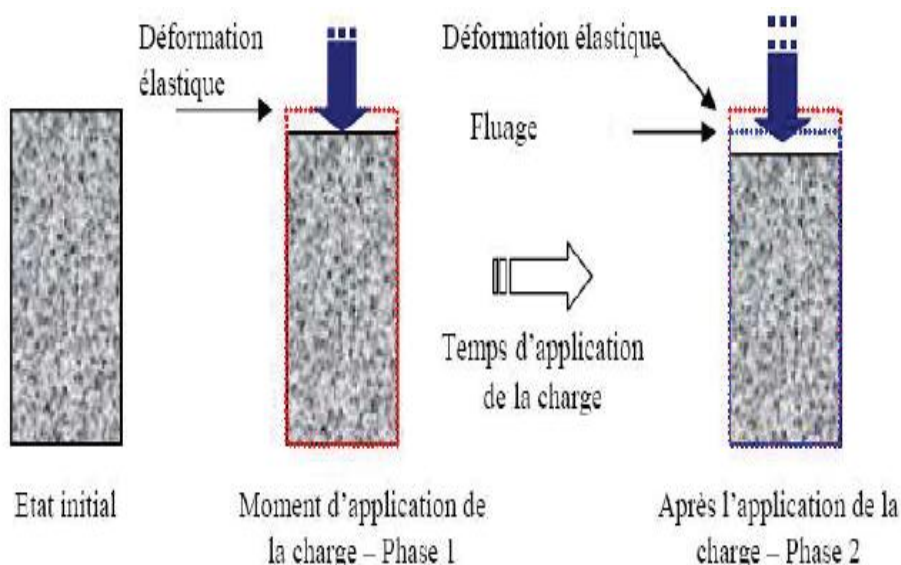


Figure I-3-14 : Représentation simplifiée du fluage. [**J. Zreiki, 2009**]

L'allure générale de la courbe déformation temps est donnée par le diagramme représenté par la figure suivante :

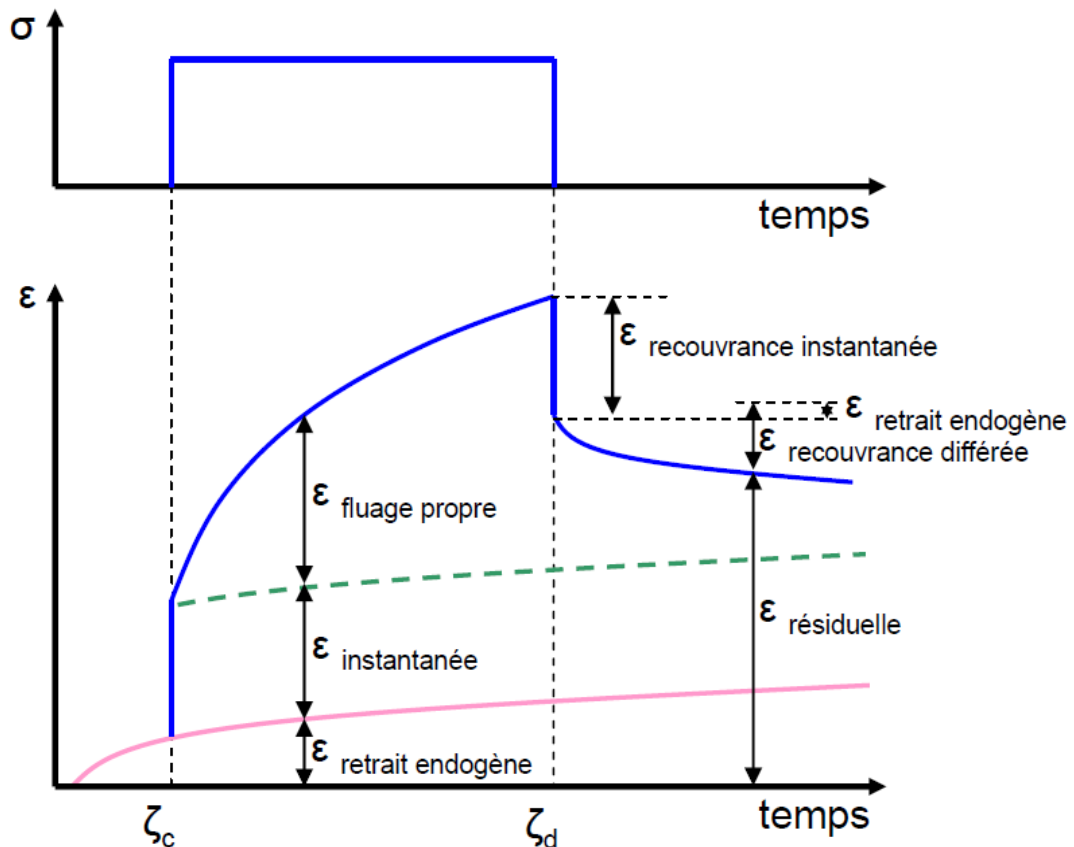


Figure I-3-15: Décomposition des déformations de fluage propre du béton (Guénot-Delahaie, 97) cité à [M. Briffaut, 2010].

I-3-3-3 Types de fluage:

La déformation de fluage est conventionnellement décomposée en une déformation de fluage propre et de fluage de dessiccation. Chacune de ces composantes correspond à une configuration d'ambiance de conservation différente (en humidité relative). Cette décomposition de la déformation de fluage est nécessaire, car les caractéristiques du fluage du béton sont très sensibles à l'humidité relative interne (Glücklich 1962, Pihlajavaara 1974, Bažant et al. 1973, Bažant et al. 1976) cité à [F. Benboudjema, 2002]

a) Fluage propre:

La déformation dite de fluage propre appelé aussi fluage endogène est la réponse donnée par le béton lorsqu'il est soumis à un chargement mécanique maintenu constant dans le temps, sans échange hydrique avec l'extérieur (en condition endogène). [W. Ladaoui, 2010]

Cette déformation ne peut être obtenue directement par la mesure des déformations d'une éprouvette de béton chargée puisque celle-ci présente des variations volumiques

même sans chargement. Il faut donc soustraire le retrait endogène et la déformation élastique instantanée lors de l'application de la charge pour obtenir le fluage propre. [M. Briffaut, 2010]

b) Fluage de dessiccation:

Le fluage de dessiccation correspond à la déformation additionnelle observée quand le béton est chargé et subit en même temps un changement d'état hydrique interne. [C. De sa, 2007]

c) Mécanismes du fluage:

Les mécanismes de fluage sont (Neville, Baron & Sauterey) :

- Mouvements internes de l'eau adsorbée ou intercrystalline.
- Ecoulement visqueux.
- Glissement entre les particules de gel.
- Microfissuration.

Brooks & Neville ont suggéré que le fluage peut être mieux expliqué par la combinaison des deux premiers mécanismes et ce sur la base des résultats d'essais en traction et en compression. Selon **Mehta**, c'est le premier mécanisme qui est à l'origine du fluage.

Les mécanismes de fluage demeurent incertains et sont encore mal élucidés (Neville, Baron Sauterey) cité à [A. Kamen, 2007]

I-3-3-4 Facteurs influençant le fluage:

De nombreux paramètres peuvent influencer le fluage des matériaux cimentaires sous sollicitations mécaniques et leurs interactions sont complexes et non complètement clarifiées (Mehta) cité à [A. Kamen, 2007].

➤ *Age du béton au moment de la mise en charge:*

Plus l'âge du béton - ou plutôt le degré d'hydratation du ciment - est avancé au moment de la première mise en charge, plus le fluage diminue. C'est bien entendu lié aussi à la résistance du béton et à la vitesse de durcissement du ciment. Mais, même pour des âges très avancés, le fluage ne disparaît jamais totalement. [S. STAQUET, 2004]

Plusieurs travaux ont montré que la cinétique et l'amplitude du fluage diminuent si l'âge du chargement augmente du fait du vieillissement (Cheyrezy & Behloul ; Loukili ; Baron & Sauterey) cité à [A.Chabane, 2012]

Le fluage est proportionnel à la contrainte appliquée à l'échantillon jusqu'à une certaine limite. (Rapport entre contrainte et résistance du matériau), Cette limite est entre (0.4 et 0.6) pour le béton, entre (0.3 et 0.75) pour les bétons à haute résistance et (0.8 et 0.85) pour les mortiers [Neville, 1995]. Au-delà de la limite de proportionnalité, le taux et l'amplitude de fluage croissent de façon significative, et l'on peut atteindre la rupture après une certaine durée, si le rapport entre contrainte et résistance atteint une valeur entre (0.8 et 0.9 %).

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-3 : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DES BAP
« RETRAIT ET FLUAGE »

Mazzotti & Savoia ont élaboré des essais de fluage en compression par cycles de courte durée (une heure pour chaque niveau) sur échantillons de béton à différents niveaux de sollicitation et à différents âges : 7, 28 et 60 jours. Ils ont observé l'apparition de la non linéarité à partir d'un niveau de chargement de 50 à 60 %, et au-delà du niveau de chargement de 85 %, le fluage tertiaire.

➤ **Rapport E/C:**

Nous constatons que le rapport (E/C) au très jeune âge (âge où l'hydratation est peu avancée) n'influence pas vraiment les déformations de fluage (**Bissonnette & Pigeon, 1995**).

Les bétons à fort ratio E/C contiennent un pourcentage élevé de pores et possèdent donc une capacité de rétention importante de l'eau dans le béton. Or, plus la teneur en eau (évaporable) est importante, plus les déformations de fluage en compression comme en traction (fluage propre, en particulier) vont croître (**Kovler, 1995 ; Smadi & al, 1987**). [A.Chabane, 2012]

A ratio (E/C) constant, par exemple, nous notons une légère diminution des déformations avec un plus fort dosage en ciment (**L'Hermite, 1978**). A l'inverse, à quantité d'eau équivalente mais pour des dosages en ciment plus faibles, les déformations de fluage augmentent. [A.Chabane, 2012]

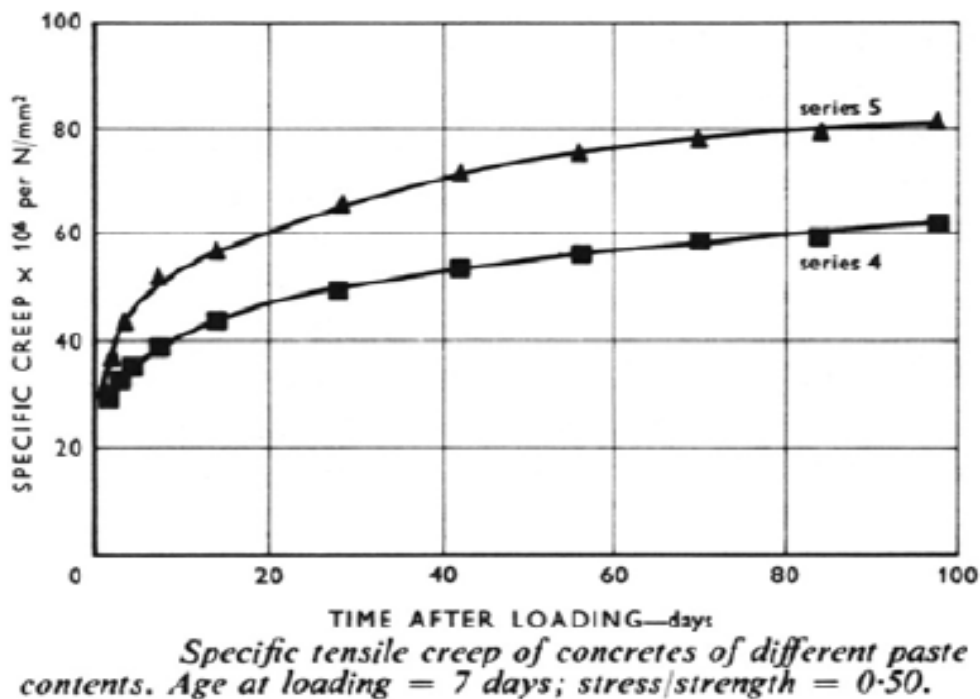


Figure I-3-16: Influence du ratio (E/C) (série 5 : E/C=0.55 ; série 4 : E/C=0.40) sur le fluage spécifique. (**Ward & Cook, 1969**). [A.Chabane, 2012]

➤ **Dosage et type de ciment :**

Il est connu que la matrice cimentaire hydratée est le siège du fluage. Malgré cela le fluage augmente si le dosage en ciment diminue et si les interfaces entre granulats et

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-3 : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DES BAP
« RETRAIT ET FLUAGE »

ciment augmentent selon **Bissonnette et coll.** Par contre, selon **Mehta**, pour un même rapport E/C, l'augmentation du dosage en ciment résulte en une augmentation du fluage du fait que le volume de pâte croît aussi.

Le type du ciment influence aussi le fluage du fait qu'il influe sur la résistance du matériau. Le fluage à un âge de chargement donné diminue si la résistance du matériau augmente (**Neville; Mehta**) cité à [**A.Chabane, 2012**]

La finesse du ciment influence aussi l'évolution des résistances au jeune âge et donc le fluage. Selon **Neville**, un ciment extrêmement fin donne un fluage au jeune âge élevé mais à long terme un plus faible fluage. [**A.Chabane, 2012**]

➤ **Adjuvant:**

Les adjuvants peuvent augmenter le fluage propre. Les adjuvants fluidifiants à base de ligno-sulfonates tendent à augmenter le fluage propre plus que les adjuvants à base de carboxylate (**Neville**). Les adjuvants qui assurent une meilleure dispersion des particules mènent aussi à un affinement de la structure des produits d'hydratation et donc augmentent le fluage (**Mehta**). [**A.Chabane, 2012**]

➤ **Granulats:**

La fonction des granulats vis-à-vis du fluage est de restreindre les déplacements de la pâte de ciment (**Smadi & al, 1987 ; Khan & al, 1997**). Leur taille et leur qualité sont particulièrement influentes sur l'état de déformation et de fissuration.

L'augmentation de la taille des granulats améliore la raideur du matériau en réduisant la capacité de déformation (**Harsh & al, 1990**).

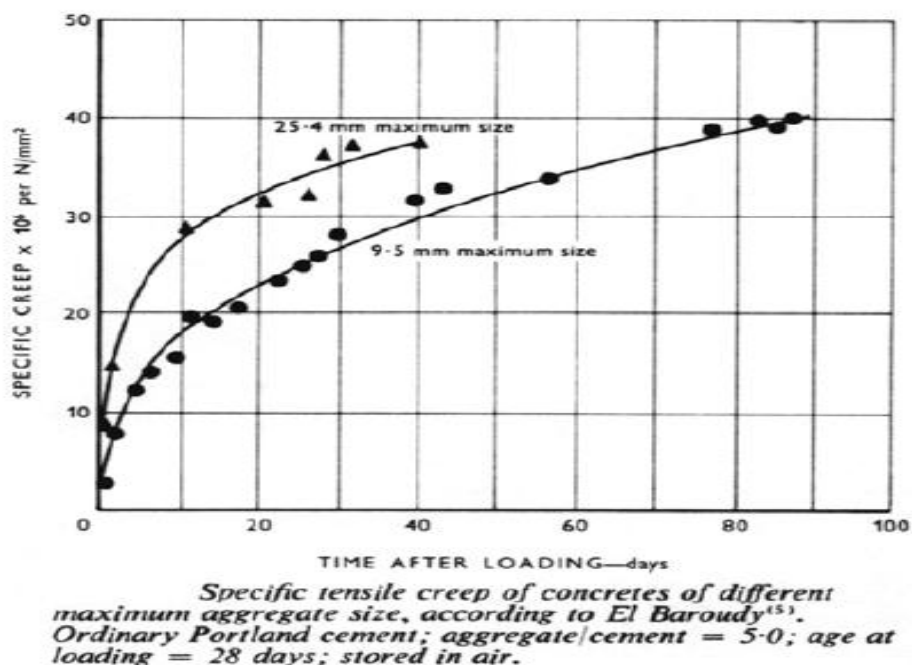


Figure I-3-17: Influence de la taille du granulat sur le fluage spécifique (**Ward & Cook, 1969**) cité à [**A. Kamen, 2007**]

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-3 : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DES BAP
« RETRAIT ET FLUAGE »

➤ **Température:**

L'effet de la température sur le fluage a été observé depuis 1959 par **Ross** pour les bétons ordinaires, d'après le même auteur le fluage est plus sensible aux changements de la maturité qu'aux changements de la résistance ou le module élastique (**De Schutter**).

D'après **Brooks et coll**, le fluage transitoire (induit par l'effet de température) est fortement lié au degré de maturité et au taux d'accroissement de température.

La plupart des études ont été consacrées au fluage en compression à des hautes températures et montrent une augmentation graduelle du fluage en fonction de la température (Figure I-1-18). **Bengougam et coll** ont observé que l'amplitude du fluage et le taux de fluage à des températures élevées sont plus importants pour un même niveau de sollicitation et la même durée : le fluage à 55 C° est environ 2 à 3 fois plus grand que celui à 20°C.

Selon **Neville**, le fluage d'un béton (E/C=0.6) sous 70 C° peut être 3.5 fois supérieur que celui à 21 C°, selon l'auteur l'accroissement du fluage du béton sous hautes températures peut être dû aux faibles résistances à long terme sous des températures élevées.

D'après **Schwesinger et coll**, pour des températures élevées le comportement viscoélastique devient non linéaire.

D'un autre côté, les essais réalisés par **Charron** indiquent que la capacité de fluage du béton est grande à basses températures et limite par conséquent plus efficacement les contraintes provoquées en conditions de déformations empêchées. [**A. Kamen, 2007**]

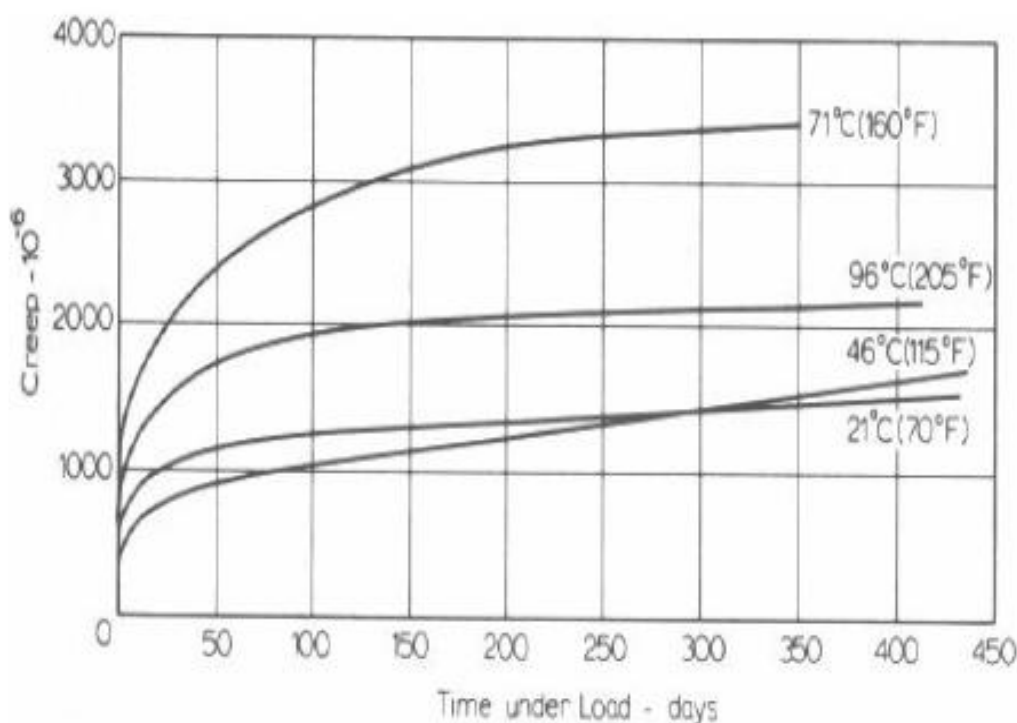


Figure I-1-18 : influence de la température sur le fluage. [**A.Chabane, 2012**]

➤ **Humidité ambiante:**

Le fluage augmente si l'humidité relative de l'environnement diminue (voir Figure I-3-19), du fait qu'elle conditionne le processus de séchage c'est-à-dire la diffusion de l'eau adsorbée et l'eau des micropores des hydrates vers l'ambiance [Neville, 95 ; Mehta, 86]. Par contre, l'influence de l'humidité relative est faible ou même négligeable si l'échantillon a atteint l'équilibre hygrométrique avec son milieu ambiant avant l'application de la charge [A. Kamen, 2007]

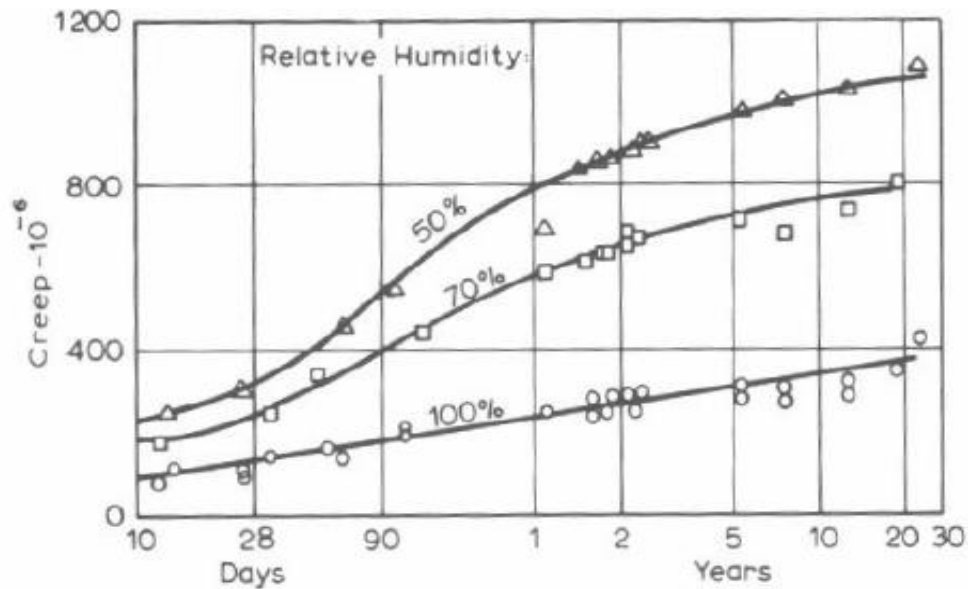


Figure I-3-19: Influence de l'humidité relative sur le fluage. [A. Kamen, 2007]

I-3-3-5 Les types d'essais mécaniques du fluage:

a) Fluage en traction:

Le travail de Reviron [N.Reviron, 2009] avait pour objectif général d'étudier expérimentalement les déformations différées du béton soumis à des contraintes de traction.



Figure I-3-20 : Vue d'ensemble du bâti de fluage en traction. [N. Reviron, 2009]

b) Fluage en compression:

Le fluage en compression a été mesuré dans les travaux de **Kamen et al** ([**A. Kamen, 2007**] sur des éprouvettes cylindriques (6.7x22 cm²) (voir figure 2.13), les bâtis de fluage permettaient un chargement sous une force maximale de 250 KN, ils ont opté pour cette section pour pouvoir tester des niveaux de chargement importants (fluage non linéaire). [**G.Benkechkache, 2012**]



Figure I-3-21: Dispositif de mesure de fluage en compression [**A. Kamen, 2007**]

c) Fluage en flexion:

i) Dispositif d'EDOUARD :

Dans les essais d'**Edouard**, les éprouvettes sont chargées à 28 jours sur des bâtis de fluage de 800 kN de capacité. La contrainte appliquée est de 85 MPa pour une résistance moyenne de 190 MPa à 35 jours. Cela correspond à un taux de chargement de 45 %. La complaisance est dans ce cas de 45 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ et le coefficient de fluage K_{fl} est de 1.0 à l'échéance de 250 jours. [**G.Benkechkache, 2012**]

ii) Dispositif de CHABANE:

Les essais sous charge maintenue (fluage) ont pour but de mesurer l'évolution de la flèche avec des taux de chargement différents 0%, 0,25% et 45% de la charge de rupture, la durée de chargement est supérieure à 90 jours. Les essais ont systématiquement effectuées à l'âge de 7 jours à une température $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et humidité relative $HR = 55 \pm 5\%$. Notons que dans cette étude il n'y a pas de séparation entre le fluage propre et dessiccation. La figure ci-dessous présente le dispositif d'essai de flexion quatre points. [**A.Chabane, 2008**]

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-3 : GENERALITES SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DES BAP
« RETRAIT ET FLUAGE »

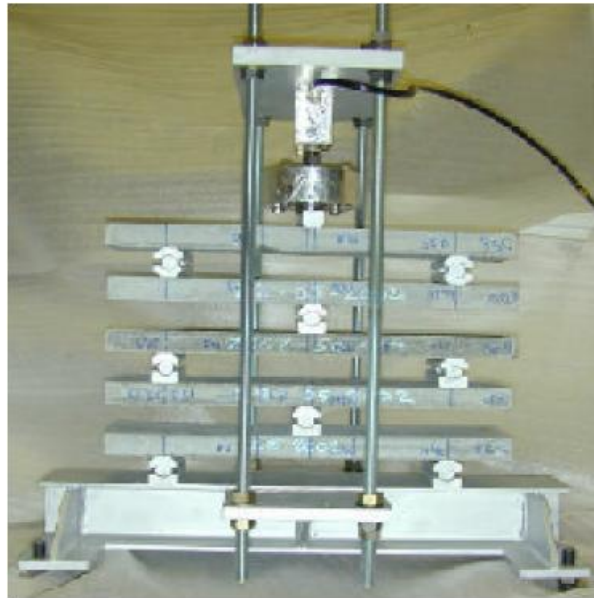


Figure I-3-22: Dispositif de fluage en flexion 3 points EDOUARD,
[G.Benkechkache,2012]

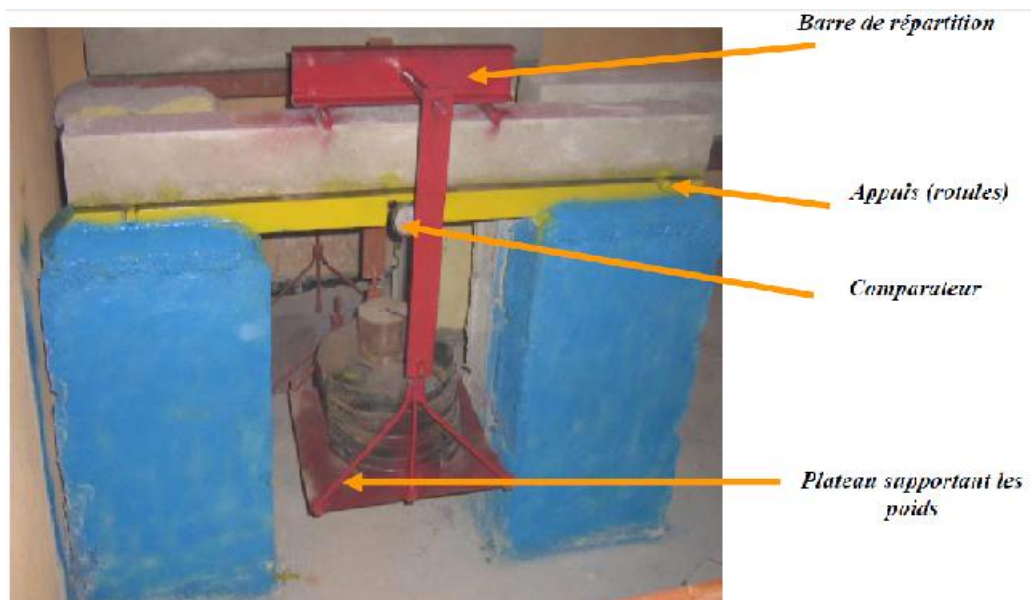


Figure I-3-23: Dispositif d'essai de flexion quatre points (bâti de fluage)
[A.Chabane, 2008]

CHAPITRE I-4 : Etude théorique des modèles de prédiction de retrait.

I-4-1 Introduction :

Au cours des deux dernières décennies, des progrès significatifs dans la compréhension du comportement différé du béton (retrait et fluage) ont été atteints, ils comprennent :

- Une grande expansion de la base de données expérimentale sur le retrait et le fluage du béton ;
- Compilation d'une banque de données informatisée ;
- Un développement de méthodes statistiques informatisées pour l'ajustement des données et d'optimisation. [EK.Zden, P. Bazant, S. Baweja, 1995]

La prédiction à long terme des déformations différées du béton nécessite forcément l'élaboration des modèles prédictifs identifiés à partir de l'exploitation et l'extrapolation des résultats des études expérimentales.

Plusieurs modèles de prédiction des déformations de retrait et de fluage ont été développés pour prédire le comportement différé du béton. Plus ou moins complexes, basés sur des principes divers et différant notamment par la quantité et le type de paramètres qu'ils font intervenir. Ils sont généralement considérés comme acceptables, en raison de la nature complexe de la modélisation de ces phénomènes (retrait et fluage), mais le problème posé c'est que ces modèles de prévision conduisent très souvent à une surestimation de la déformation totale du béton. (Bazant, 2001),

Tous les modèles prédictifs du retrait utilisent actuellement des formules similaires en fonction du temps et qu'ils ont le même principe : une courbe hyperbolique qui tend vers une valeur asymptotique de retrait ultime final. Ces modèles sont également inclure des mesures de la résistance mécanique du béton, des conditions de cure, des conditions d'environnement, la composition du béton et le temps de séchage en leurs calculs.

Il existe plusieurs modèles de prédiction de retrait, mais les modèles les plus précis et récemment développés sont : le modèle B3 de Bazant et Le modèle GL2000 de Gardner et Lockman. Ces modèles ont été mis au point de manière empirique à partir d'une base de données des données de retrait comportant un vaste éventail de points de données.

Dans la littérature, nous trouvons de nombreux modèles pour décrire le retrait et le fluage du béton ordinaire. Malheureusement, ce n'est pas le cas pour les bétons autoplaçants par ce que les déformations différées des bétons autoplaçant (BAP) s'avèrent souvent fortement sous estimées par les modèles règlementaires qui ne prennent pas en compte les caractéristiques des matériaux constitutifs.

Six (6) modèles réglementaires de prédiction du comportement différé (retrait) du béton sont détaillés dans ce mémoire.

❖ Trois modèles européens :

- CEB 90 (version 93) [CEB-FIP, 1993],

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

- CEB 90 (version 99) [CEB-FIP, 1999],
- Eurocode 2 (2005),
- ❖ Trois modèles américains :
 - ACI 209 [ACI Comité 209, 1992],
 - B3 [Bazant, 1995a],
 - GL 2000 Gardner-Lockman.

Le modèle ACI 209 est de loin le plus ancien de ces modèles, mais il est toujours utilisé actuellement aux Etats-Unis.

L'objet de ce travail est de faire une comparaison entre ces modèles réglementaires, ensuite comparer les résultats expérimentaux aux ces modèles prédictifs.

Cependant, les modèles restent valables pour bétons spéciaux si les paramètres du modèle sont calibrés par des essais.

I-4-2 Les modèles de prédiction:

L'objectif de ce paragraphe n'est pas de présenter les équations constitutives de chacun de ces modèles en détail, mais de se focaliser sur le principe de chaque modèle et sur les paramètres matériaux, géométriques et environnementaux requis par leur utilisation.

I-4-2-1 Les modèles Européens :

a) CEB MC-90 :

Ce modèle a été mis en point conjointement par le Comité Euro-International du Béton (CEB) et la Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP). Il est basé sur les recherches de "Muller et Hildorf " et publié en 1990. il possède un vaste domaine d'application pour la prédiction du retrait et fluage, il utilise une fonction hyperbolique et une valeur ultime de retrait corrigée qui dépend du dosage de ciment et des conditions d'environnement (même principe que le modèle ACI209R-92).

Ce modèle ne prend pas en compte l'effet de la cure (durée et méthode), mais tient en compte de l'humidité relative et la taille de l'élément.

i) Limites d'application du modèle :

Tableau I-4-1 : Limites d'application du modèle CEB-MC 90

La résistance caractéristique	$20 \leq f_c \leq 90$ MPa
L'humidité relative	$40\% \leq RH \leq 100\%$
La température moyenne	$5 \leq T^\circ \leq 30$ C°
Le rapport (E/C)	$0,35 \leq E/C \leq 0,85$
Type de ciment	I,II,III

ii) Les paramètres requis :

En calculant le retrait suivant le modèle CEB MC90-99, les paramètres suivants sont exigés :

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

- ✓ Age du béton au début du séchage (jours),
- ✓ Résistance moyenne à la compression du Béton à 28 jours (MPa),
- ✓ Humidité relative (hygrométrie) exprimée en décimale,
- ✓ Le rapport (Volume / surface) (mm),
- ✓ Type de ciment,
- ✓ Température (T°).

iii) Calcul du retrait :

La déformation totale du retrait de béton $\varepsilon_{sh}(t, t_c)$ est calculée à partir de l'équation :

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{cso} \beta_s(t - t_c) \dots \dots \dots (5)$$

Où :

- $\varepsilon_{sh}(t, t_c)$: Retrait total ;
- t : Age du béton (jours) à l'instant considéré ;
- t_c : Age du béton au début de séchage (jours) ;
- $(t - t_c)$: Durée de séchage (jours).
- $\beta_s(t - t_c)$: Coefficient qui décrit le développement du retrait en fonction du temps de séchage ;
- ε_{cso} : Coefficient fictif de retrait.

✚ ε_{cso} *coefficient fictif de retrait* : peut être obtenu par l'équation (6) :

$$\varepsilon_{cso} = \varepsilon_s(f_{cm28}) \cdot \beta_{RH}(h) \dots \dots \dots (6)$$

◆ $\varepsilon_s(f_{cm28})$: facteur tenant compte de la résistance du béton sur le retrait ultime;

$$\varepsilon_s(f_{cm28}) = \left[160 + 10\beta_{SC} \left(9 - \frac{f_{cm28}}{f_{cm0}} \right) \right] \times 10^{-6} \dots \dots (7)$$

- * β_{SC} : Coefficient tenant compte du type de ciment sur le retrait ultime, (tableau I-4-2)
- * f_{cm28} : Résistance caractéristique du béton à 28 jours,
- * f_{cm0} : Résistance moyenne du béton à 28 jours ($f_{cm0}=10$) (MPa),

Tableau I-4-2: β_{SC} en fonction du type de ciment, selon le modèle CEB MC90.

Type de ciment selon EC2	β_{SC}
SL (Durcissement Lent) = type II	4
N et R (Normale ou durcissement Rapide) = type II	5
RS (durcissement rapide, de haute résistance) = type III	8

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

♦ $\beta_{RH}(h)$: Coefficient prenant en compte les conditions de conservations du retrait ultime;

$$\begin{cases} \beta_{RH}(h) = -1,55 \left[1 - \left(\frac{h}{h_0} \right)^3 \right] & \text{pour } 0,4 \leq h < 0,99 \\ \beta_{RH}(h) = 0,25 & \text{pour } h \geq 0,99 \end{cases} \dots \dots \dots (8)$$

* h : Taux d'humidité relative ambiante en décimale ;

* h_0 : Est égal à 1.

✚ $\beta_S(t - t_c)$ Coefficient décrivant le développement du retrait dans le temps:

$$\beta_S(t - t_c) = \left[\frac{(t-t_c)/t_1}{350[(V/S)/(V/S)_0]^2 + (t-t_c)/t_1} \right]^{0,5} \dots (9)$$

♦ $(t - t_c)$: Durée de séchage (jours) ;

♦ t_1 : est égal à 1 jour ;

♦ V/S : Est le rapport (volume/surface) (mm) ;

♦ $(V/S)_0$: Est égal à 50 mm.

NOTE :

Si le béton est mis a une température supérieure à 30 °C, CEB MC90 recommande une correction pour $\beta_{RH}(h)$ et $\beta_S(t - t_c)$, représentée comme suit.

-L'effet de la température sur le coefficient fictif de retrait est pris en compte par :

$$\beta_{RH.T} = \beta_{RH}(h) \left[1 + \left(\frac{0,08}{1,03-h/h_0} \right) \left(\frac{T/T_0-20}{40} \right) \right] \dots \dots \dots (10)$$

- L'effet de la température sur l'évolution temporelle de retrait est pris en compte

Par :

$$\beta_{S.T}(t - t_c) = \left[\frac{(t-t_c)/t_1}{350[(V/S)/(V/S)_0]^2 \exp[-0,06 \left(\frac{T}{T_0} - 20 \right)] + (t-t_c)/t_1} \right]^{0,5} \dots \dots \dots (11)$$

Où:

- $\beta_{RH.T}$: Est un facteur d'humidité relative corrigée par la température qui remplace β_{RH} dans l'équation (6) ;
- $\beta_{S.T}(t - t_c)$: Est un coefficient dépendant de la température remplaçant $\beta_S(t - t_c)$ dans l'équation (9);
- h : Est le taux d'humidité relative ambiante en décimale ;
- h_0 : Est égal à 1 ;

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

- V/S : Est le rapport volume/surface ;
- $(V/S)_0$: Est égal à 50mm ;
- T : Est la température ambiante ($^{\circ}\text{C}$) ;
- T_0 : Est égale à 1 $^{\circ}\text{C}$.

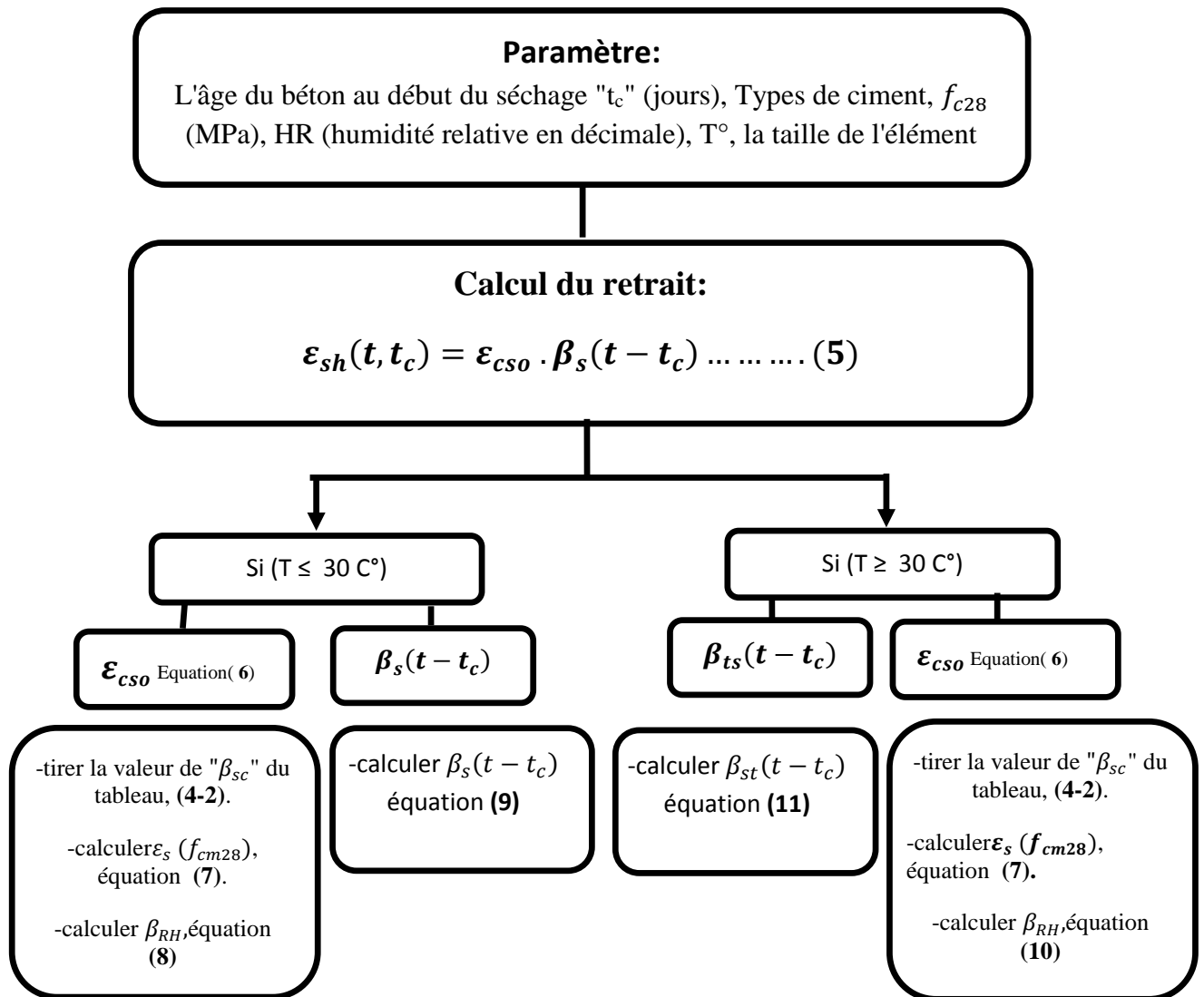


Figure I-4-1 : Organigramme du calcul du retrait selon le modèle CEB MC 90.

b) CEB MC 90-99:

Le modèle CEB MC 90-99 (CEB 1999) inclut les dernières améliorations apportées au modèle CEB MC90. Il a été développé pour le béton ordinaire et à haute résistance, et pris en considération la séparation du retrait total en retrait endogène et retrait de dessiccation, la composante du retrait de dessiccation est liée à l'approche donnée au CEB MC90 (CEB1993), pour le retrait endogène, certains ajustements sont rajoutés.

i) Limites d'application du modèle :

Tableau I-4-3 : Limites d'application du modèle CEB-MC 99

La résistance caractéristique	$15 \leq f_c \leq 120$ MPa
L'humidité relative	$40\% \leq RH \leq 100\%$
La température moyenne	$5 \leq T \leq 30$ C°
Le rapport (E/C)	$0,35 \leq E/C \leq 0,85$
Type de ciment	I,II,III

ii) Les paramètres requis :

En calculant le retrait suivant le modèle CEB-MC 99, les paramètres suivants sont exigés :

- ✓ Age du béton au début du séchage (jours);
- ✓ Résistance moyenne à la compression du Béton à 28 jours (MPa);
- ✓ Humidité relative (hygrométrie) exprimée en décimale;
- ✓ Le rapport (Volume / surface) (mm) ;
- ✓ Type de ciment;
- ✓ Température (T°).

iii) Le calcul du retrait:

Le retrait total de béton $\varepsilon_{sh}(t, t_c)$ peut être calculé à partir de l'Equation (12) :

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_c) \dots \dots \dots (12)$$

- $\varepsilon_{sh}(t, t_c)$: Le retrait total ;
- $\varepsilon_{cas}(t)$: Le retrait endogène ;
- $\varepsilon_{cds}(t, t_c)$: Le retrait de dessiccation.

✚ **calcul détaillé du retrait endogène $\varepsilon_{cas}(t)$** : Le composant du retrait endogène est indépendant de l'humidité ambiante et de la taille de l'élément, et se développe plus rapidement que retrait de dessiccation, il est calculée à partir de l'Equation (13):

$$\varepsilon_{cas}(t) = \varepsilon_{cas0}(f_{cm28})\beta_{as}(t) \dots \dots \dots (13)$$

Où :

- ◆ $\varepsilon_{cas0}(f_{cm28})$: Coefficient fictif de retrait endogène qui est en fonction de l'équation (14) :

$$\varepsilon_{cas0}(f_{cm28}) = -\alpha_{as} \left(\frac{f_{cm28}/f_{cm0}}{6+f_{cm28}/f_{cm0}} \right)^{2,5} \times 10^{-6} \dots \dots (14)$$

- * α_{as} : Coefficient qui dépend du type de ciment (**Tableau 4-4**),
- * f_{cm28} : Résistance moyenne à la compression du béton à l'âge de 28 jours (MPa) ;

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

* f_{cm0} : Résistance moyenne du béton à 28 jours ($f_{cm0}=10$) (MPa),

Tableau I-4-4: Les valeurs du coefficient " α_{as} " en fonction du type de ciment selon CEB-MC99.

Type de ciment selon EC2	α_{as}
<i>SL (Durcissant Lent)</i>	800
<i>N et R (Normale ou durcissement Rapide)</i>	700
<i>RS (durcissement rapide, de haute résistance)</i>	600

♦ $\beta_{as}(t)$: Coefficient qui décrit le développement du retrait endogène avec le temps, équation (15):

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{\left[-0,2\left(\frac{t}{t_1}\right)^{0,5}\right]} \quad \text{.....(15)}$$

Où :

* $t_1=1$ jour;

✚ **calcul détaillé du retrait de dessiccation $\varepsilon_{cds}(t, t_c)$** : est calculé à par l'équation (16)

$$\varepsilon_{cds}(t, t_c) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm28}) \beta_{RH}(h) \beta_{ds}(t - t_c) \quad \text{.....(16)}$$

Où:

♦ $\varepsilon_{cds0}(f_{cm28})$: Coefficient fictif de retrait de dessiccation équation (17),

$$\varepsilon_{cds0}(f_{cm28}) = \left[(220 + 110\alpha_{ds1}) \exp\left(-\frac{\alpha_{ds2}f_{cm28}}{f_{cm0}}\right) \right] \times 10^{-6} \quad \text{.....(17)}$$

* α_{ds1} et α_{ds2} : Coefficients qui dépendent du type de ciment (**Tableau I-4-5**).

* f_{cm28} : Résistance moyenne à la compression du béton à l'âge de 28 jours (MPa) ;

* f_{cm0} : Résistance moyenne du béton à 28 jours ($f_{cm0}=10$) (MPa),

Tableau I-4-5: Les valeurs des Coefficients " α_{ds1} α_{ds2} " en fonction du type de ciment, selon le model CEB MC90-99.

Type de ciment selon EC2	α_{ds1}	α_{ds2}
SL (Durcissant Lent)	3	0,13
N et R (Normale ou durcissement Rapide)	4	0,12
RS (durcissement rapide, de haute résistance)	6	0,12

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

♦ $\beta_{RH}(h)$: Coefficient qui prend en compte l'effet d'humidité relative de retrait de dessiccation, équation (18).

$$\begin{cases} \beta_{RH}(h) = -1,55 \left[1 - \left(\frac{h}{h_0} \right)^3 \right] & \text{pour } 0,4 \leq h < 0,99\beta_{sl} \dots\dots(18) \\ \beta_{RH}(h) = 0,25 & \text{pour } h \geq 0,99\beta_{sl} \end{cases}$$

$$\beta_{sl} = \left(\frac{3,5f_{cm0}}{f_{cm28}} \right)^{0.1} \leq 1,0 \dots\dots (19)$$

Où :

* β_{sl} : Coefficient qui prend en compte l'auto-dessiccation au béton à haute performance.

♦ $\beta_{ds}(t - t_c)$: Fonction qui décrit le développement du retrait de dessiccation avec le temps, équation (20).

$$\beta_{ds}(t - t_c) = \left[\frac{(t-t_c)/t_1}{350[(V/S)/(V/S)_0]^2 + (t-t_c)/t_1} \right]^{0.5} \dots\dots\dots (20)$$

Où :

- * h : Taux d'humidité relative ambiante en décimale ;
- * h_0 : Egal à 1 ;
- * (V/S) : Est le rapport volume-surface ;
- * $(V/S)_0$: Est égal à 50 mm ;
- * $f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$;
- * t_c : Age du béton au début de séchage (jours) ;
- * $(t - t_c)$: Durée de séchage (jours).

Nous proposons l'organigramme (Figure I-4-2) qui calcule le retrait selon le modèle CEB MC 90-99 :

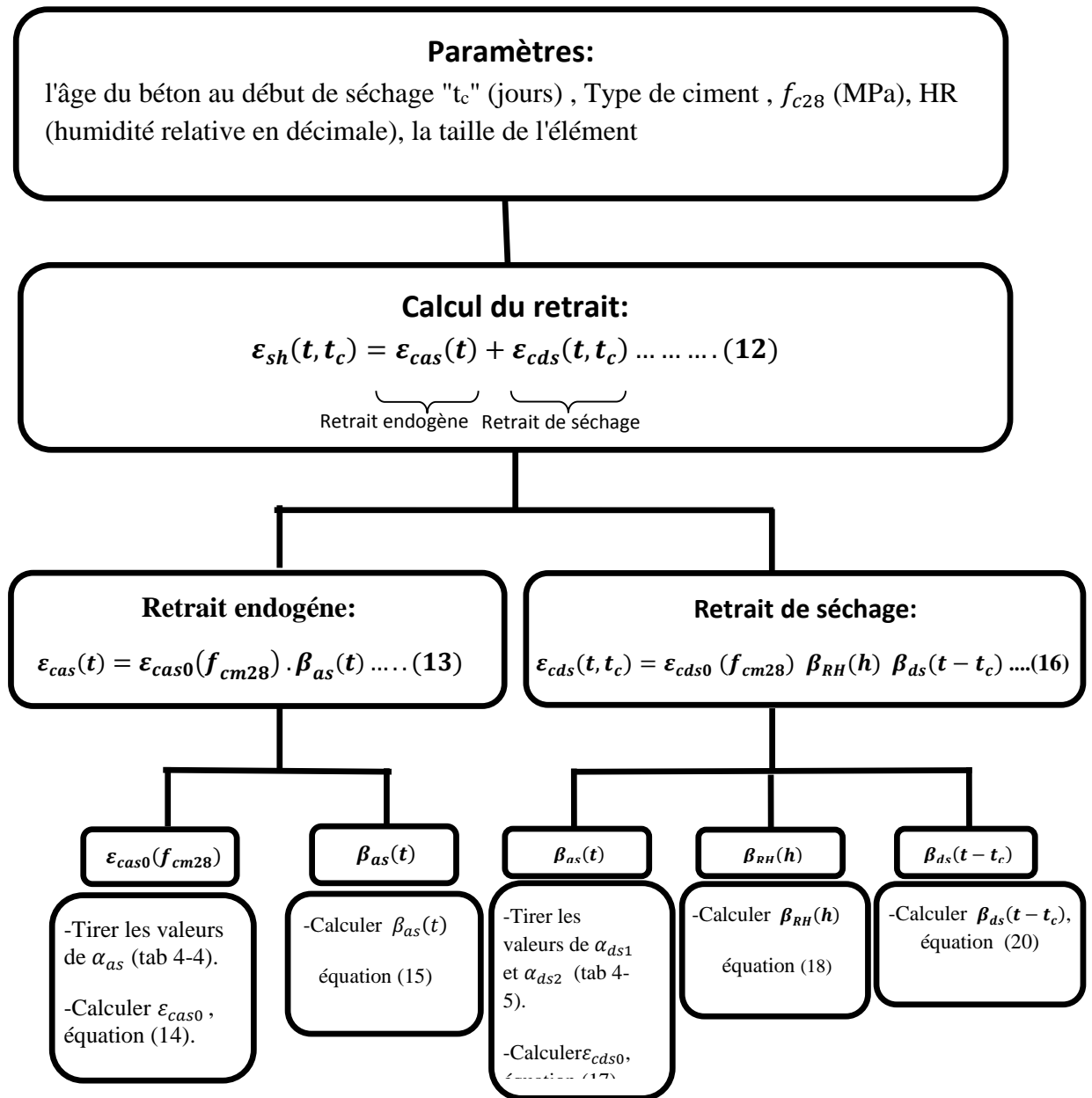


Figure I-4-2: Organigramme du calcul du retrait selon le modèle CEB MC 90- 99.

c) Le modèle de l’Eurocode 2:

Les déformations de retrait peuvent être calculées à l'aide de l’Eurocode 2, publié en 2005 par le Bureau de normalisation et qui reprend, dans les grandes lignes, le modèle déjà introduit dans la norme NBN B 15-002. Cependant, ce dernier modèle ne faisait pas de distinction entre les deux composantes du retrait et les intégrait dans une seule valeur. La version actuelle de l’Eurocode 2 formule de manière plus détaillée le calcul du retrait endogène. Cette formulation permet de prendre en compte ce phénomène plus correctement, surtout pour les bétons à haute résistance. [B. Parmentier, V. Pollet , G. Zarmati, 2009]

i) Limites d'application du modèle :

Tableau I-4-6: Les limites d'application du modèle Eurocode 2.

La résistance caractéristique	$(12/15) \leq f_c \leq (50/60)$ MPa
L'humidité relative	$40\% \leq RH \leq 100\%$
Durée minimale de cure du béton	$t = 0.5$ jour
Températures moyennes :	$T = 10$ à 20°C

ii) Les paramètres requis:

- ✓ Âge du béton lors du séchage commence, généralement considérée comme l'âge à la fin de la cure humide, (jours);
- ✓ type de ciment;
- ✓ la classe de ciment;
- ✓ résistance moyenne à la compression du Béton à 28 jours (MPa);
- ✓ Humidité relative (hygrométrie) exprimée en décimal;
- ✓ la taille de l'élément ;

iii) Calcul du retrait:

La déformation de retrait totale (ϵ_{cs}) se compose de deux parties. La première est liée au retrait de séchage (ϵ_{cd}) et la deuxième au retrait endogène (ϵ_{ca}). Le retrait de séchage évolue lentement car il est fonction de la migration de l'eau au travers du béton durci. La déformation du retrait endogène se développe au cours du durcissement du béton : elle se produit dès lors en majeure partie durant les premiers jours qui suivent le coulage. La déformation totale de retrait peut être calculée par la relation suivante :

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} \dots \dots \dots (21)$$

Où :

- ϵ_{cs} : La déformation totale de retrait
- ϵ_{cd} : La déformation due au retrait de séchage
- ϵ_{ca} : La déformation due au retrait endogène.

Les valeurs de l'expression (21) dépendent de nombreux paramètres, parmi lesquels, bien entendu, le temps. Notons par ailleurs que le retrait s'exprime en $\mu\text{m/m}$ (10^{-6} m/m).

✚ Prédiction du retrait endogène: La déformation due au retrait endogène peut être calculé par l'expression suivante :

$$\epsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \epsilon_{ca}(\infty) \dots \dots \dots (22)$$

Où :

◆ $\epsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \dots \dots \dots (23)$

◆ $\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot t^{0,5}) \dots \dots \dots (24)$

Avec t : Est l'âge du béton (jours).

✚ **Prédiction du retrait de séchage:** L'évolution du retrait de séchage est donnée par l'expression suivante :

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot \underbrace{k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}}_{\varepsilon_{cd,\infty}} \dots \dots \dots (25)$$

Où :

- $\beta_{ds}(t, t_s)$: Une fonction qui traduit l'évolution dans le temps du retrait de séchage (β_{ds} vaut 1 pour le calcul de la valeur finale du retrait).
- Cette fonction dépend de h_0 (en mm), ($h_0 = 2 A_c/u$). A_c est la section de la pièce de béton considérée et u son périmètre exposé au séchage tandis que t_s représente la durée de la cure
- k_h : Un coefficient dépendant du rayon moyen h_0 , conformément à la figure (I-4-4).
- $\varepsilon_{cd,0}$: La valeur nominale du retrait de séchage.
- t : L'âge du béton à l'instant considéré, en jours
- t_s : L'âge du béton (jours) au début du retrait (en général à la fin de la cure).
- $(t-t_s)$: Le temps de séchage,
- h_0 : Le rayon moyen (mm) de la section transversale = $(2A_c/u)$.

Avec:

- A_c : Aire de la section du béton,
- u : Périmètre de la partie de la section exposée à la dessiccation.

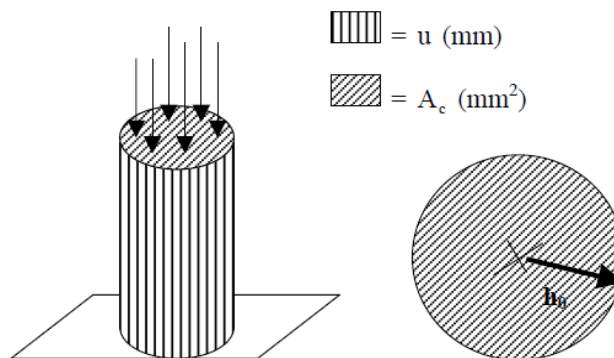


Figure I-4-3 : Représentation du rayon moyen h_0 .

◆ K_h :

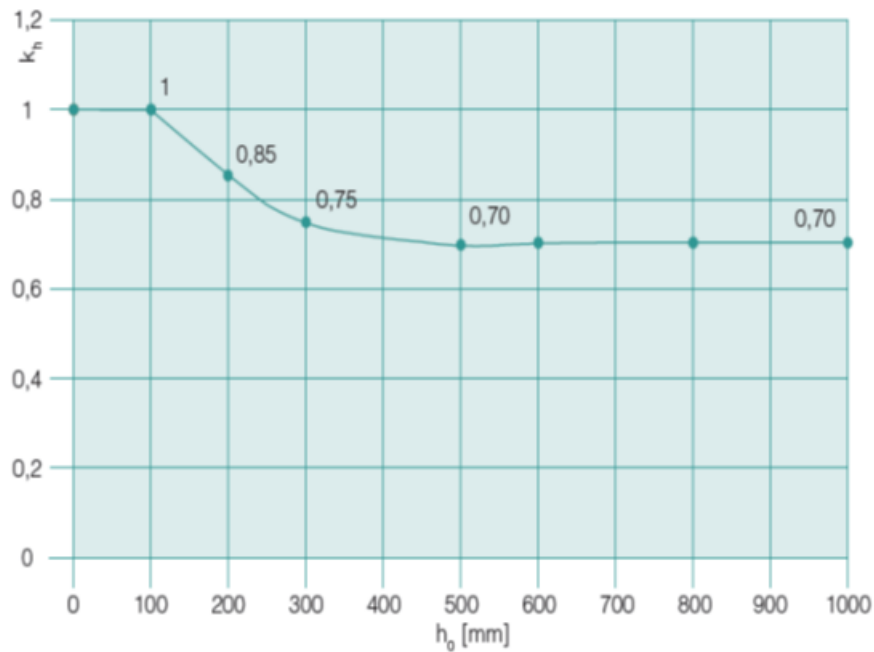


Figure I-4-4 : Valeurs de k_h en fonction du rayon moyen h_0 . [B. Parmentier, V. Pollet, G. Zarmati, 2009]

♦ **Calcul détaillé de $\epsilon_{cd,0}$ et β_{ds} :**

Le calcul détaillé de $\epsilon_{cd,0}$ est le suivant :

$$\epsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{10})} \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} \dots (26)$$

Dans cette équation :

$$* \beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right], \dots (27)$$

* RH : L'humidité relative ambiante (%),

* RH₀ : L'humidité relative ambiante de référence (100 %),

* f_{cm} : La résistance moyenne en compression du béton (MPa),

* α_{ds1} et α_{ds2} : Coefficients qui tiennent en compte du type de ciment, tableau (I-4-7) et tableau (I-4-8).

Tableau I-4-7 : Les valeurs de α_{ds1} en fonction de type de ciment.

Types de ciment	α_{ds1}
ciments lents (classe S : 32,5 N)	3
ciments normaux (classe N : 32,5 R – 42,5 N)	4
ciments rapides (classe R : 42,5 R – 52,5 N – 52,5 R)	6

Tableau 4-8 : Les valeurs de α_{ds2} en fonction de la classe de ciment.

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

Type de ciment	α_{ds2}
ciments de classe S	0.13
Ciments de classe N	0.12
ciments de classe R	0.11

♦ *Le calcul détaillé de $\beta_{ds}(t, t_s)$ est le suivant* : L'évolution dans le temps du retrait de séchage se traduit par la formule suivante:

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t-t_s)}{(t-t_s) + 0,04\sqrt{h_0^3}} \dots\dots(28)$$

Où :

- * t : L'âge du béton à l'instant considéré (jours)
- * t_s : L'âge du béton (jours) au début du retrait de séchage (ou gonflement). Normalement, ceci correspond à la fin de la cure.
- * h_0 : Le rayon moyen de la section. Celui-ci est égal à $(2A_c/u)$,

Où :

- A_c : Représente l'aire de la section de béton,
- u : Le périmètre de la partie de la section exposée au séchage.

[B. Parmentier, V. Pollet, G. Zarmati, 2009]

NOTE:

$\epsilon_{cd,0}$ et β_{ds} peuvent être calculés par les formules cités précédemment ou donnés sous forme d'abaques à deux entrées.

♦ $\epsilon_{cd,0}$ en fonction de la classe de ciment et de la résistance du béton et l'humidité relative.

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

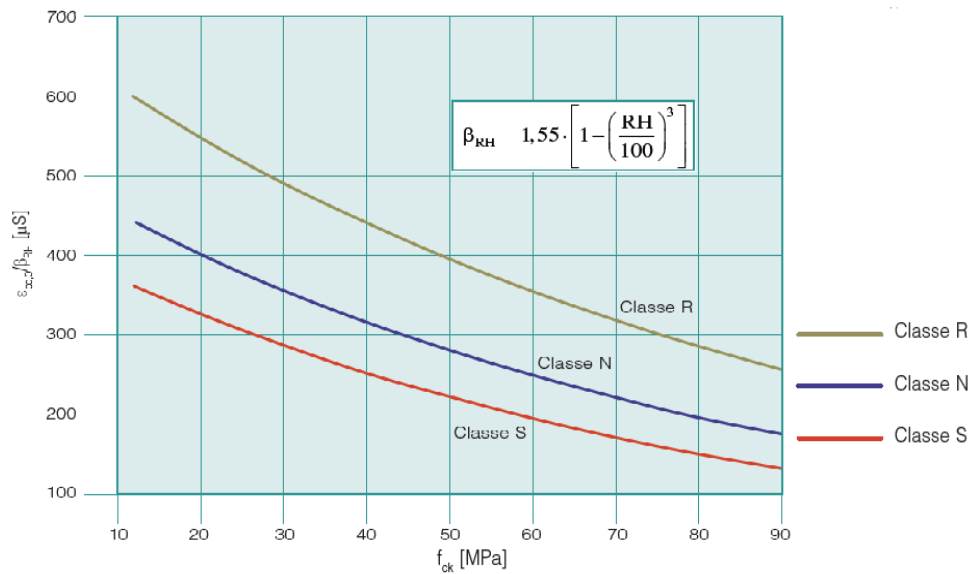


Figure I-4-5 : Valeurs de $[\epsilon_{cd,0}/\beta_{RH}]$ en fonction de la résistance à la compression " f_{c28} " et la classe de ciment. [B. Parmentier, V. Pollet, G. Zarmati, 2009]

◆ β_{ds} en fonction de la résistance en du rayon moyen h_0 et la durée de séchage.

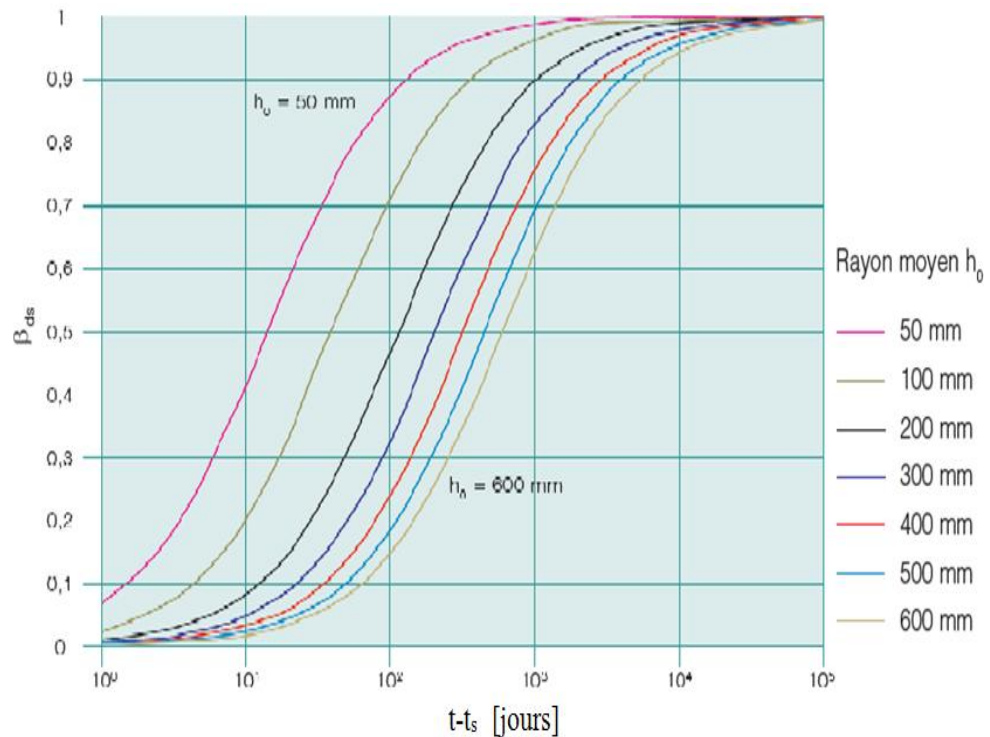


Figure I-4-6 : coefficient β_{ds} en fonction du rayon moyen h_0 . La durée d'exposition ($t-t_s$) représente la durée de séchage. [B. Parmentier, V. Pollet, G. Zarmati, 2009]

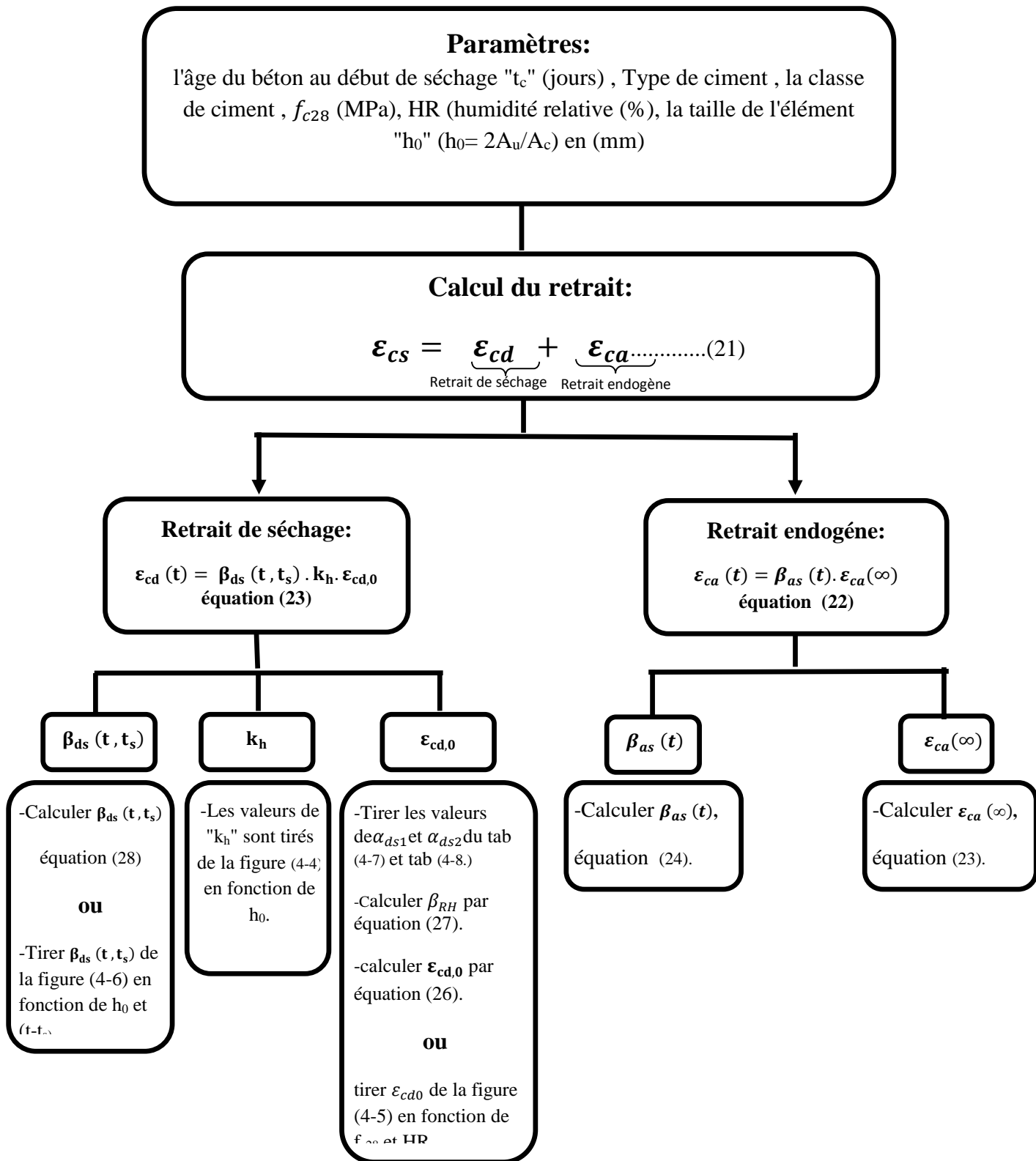


Figure I-4-7: Organigramme du calcul du retrait selon le modèle Eurocode 2.

I-4-2-2 Les modèle Américains:

a) Le modèle B3:

Le Bazant-Baweja (1995) B3 modèle est développé par Bazant et ses collègues de l'Université North-western. Ce modèle (B3) est le plus simple des modèles de prévision actuels, convient mieux avec les données expérimentales et est le mieux justifié théoriquement que les autres modèles. Ce modèle s'est développé à partir des travaux antérieurs de Bazant, et a évolué chronologiquement du modèle de BP (1978) au modèle de BPKX (1991) et finalement au modèle de B3 (Bazant 2001). Il intègre des variables telles que l'humidité relative, la taille de spécimen, temps de séchage, module d'élasticité, le type de ciment, et des conditions de cure. [J.Ping Lam, 2002] et [CH. Clarke,2009]

Le modèle B3 exige un grand nombre de paramètres de calcul en comparaison avec le modèle ACI-209, CEB-MC 90-99 et le modèle GL2000.

i) Les limites d'application du modèle :

Tableau I- 4-9 : Les limites d'application du modèle B3.

Dosage en ciment [Kg/m ³]	$160 \leq C \leq 720$
Le rapport Eau/ciment (W/C) [en poids]	$0,35 \leq (W/C) \leq 0,85$
Le rapport Agrégat/ciment (a/c) [en poids]	$2,5 \leq (a/c) \leq 13,5$
La résistance caractéristique [MPa]	$17 \leq f_c \leq 70$
Humidité relative	$40\% < H < 100\%$

ii) Les Paramètres requis:

Pour calculer le retrait suivant le modèle B3, les paramètres suivants sont exigés :

- ✓ Âge du béton lors du séchage commence, généralement considérée comme l'âge à la fin de la cure humide, (jours);
- ✓ Contenu de l'eau dans le béton (kg/m³);
- ✓ Type de ciment;
- ✓ Résistance moyenne à la compression du Béton à 28 jours (MPa);
- ✓ Module d'élasticité du béton à 28 jours (MPa);
- ✓ Les conditions de cure;
- ✓ Humidité relative (hygrométrie) exprimée en décimal ;
- ✓ Forme de l'échantillon ;
- ✓ Le Rapport (volume/surface) ou l'épaisseur de la section transversale efficace (mm). [ACI209.2R,08]

iii) Calcul de retrait :

La déformation de retrait $\epsilon_{sh}(t)$ est définie au temps (t) en fonction de la date de fin de cure, elle possède une valeur asymptotique de déformation de retrait $\epsilon_{sh\infty}$ (équation 29) et dépend d'un facteur K_h , fonction de l'humidité relative ambiante (tableau 4-13).la déformation est donnée par l'équation suivante : (Bazant 1995).

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

$$\varepsilon_{sh}(t) = -\varepsilon_{sh\infty} \cdot k_h \cdot S(t, t_0) \dots \dots \dots (29)$$

Où:

- t : Temps, soit l'âge du béton (jours),
- t₀ : Temps, soit l'âge du béton au début de séchage (jours),
- ε_{sh∞}: Déformation de retrait ultime (10⁻⁶),
- k_h : Facteur tenant compte de l'effet de l'humidité relative sur le retrait,
- S(t,t₀) : Fonction décrivant l'évolution du retrait avec le temps,

✚ *Calcul déformation de retrait ultime ε_{sh∞} :*

$$\varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_{s\infty} \frac{E(7+600)}{E(t_0+\tau_{sh})} \dots \dots \dots (30)$$

- E(t) = E(28) $\left(\frac{t}{4+0,85t}\right)^{0.5} \dots \dots \dots (31)$
- E₂₈ = 4734 √f_{c28} [EK.Zden ,P. Bazant, S. Baweja,1995]
- ε_{sh∞}: Déformation de retrait ultime (10⁻⁶),
- t₀ : L'âge du béton au début de séchage (jours),
- E(7+600) = E(607) : la valeur de la raideur élastique à 607 jours,
- ε_{s∞}: Déformation de retrait au temps t,
- τ_{sh} : Temps mis pour atteindre la moitié du retrait (jours),

♦ *Calcul de la déformation de retrait au temps t ε_{s∞}:*

$$\varepsilon_{s\infty} = c^{ste} = \alpha_1 \alpha_2 [1,9 \times 10^{-2} w^{2,1} (f_c)^{-0,28} + 270] \cdot 10^{-6} \quad (SI) \dots \dots (32)$$

- * α₁ : Qualifie le type de ciment, (Tableau I-4-10).
- * α₂ : Qualifie le mode de cure du béton, (Tableau I-4-11).
- * w : La teneur en eau (Kg/m³),

Tableau I-4-10 : Les valeurs de "α₁" en fonction de type de ciment.

Type de ciment	α ₁
ASTM de type I	1
ASTM de type II	0,85
ASTM de type III	1,1

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

Tableau I-4-11: Valeurs de " α_2 " en fonction de mode de cure du béton.

Mode de cure du béton	α_2
les cures vapeurs	0,75
les cures normales ou si h 1	1
les bétons scellés pendant la cure	1,2

♦ **Calcul du Fonction de retrait mi-temps " τ_{sh} "**, dépend d'un paramètre " k_t " (fonction de la date de fin de cure " t_0 "), d'un facteur de forme " k_s " et d'une caractéristique géométrique de l'élément " D ".

$$\tau_{sh} = K_t (K_s D)^2 \dots (33)$$

- * $K_t = 0,085 t_0^{-0.08} f_c^{-0.25}$ (SI).....(34)
- * K_s : Facteur tenant compte de la forme de la section transversale
- * D : Epaisseur effective de la section transversale de l'élément de béton, [$D=2\text{Volume}/\text{Surface}$].

Tableau I-4-12 : Valeurs de " k_s " en fonction de la forme du spécimen.

Forme du spécimen	k_s
une dalle infinie	1
un cylindre infini à base circulaire	1,15
un prisme infini à base carrée	1,25
une sphère	1,3
Un cube	1,55

✚ **K_h coefficient dépend de l'humidité :**

Tableau I-4-13 : Les valeurs de " k_h " en fonction de l'humidité relative.

Humidité relative	k_h
$h \leq 0,95$	$1-h^3$
$0.98 \leq h \leq 1.00$ (12.74 -12.94h)	interpolation linéaire
$h=1$	-0,2

✚ **Calcul de fonction de l'évolution du retrait $S(t, t_0)$:**

$$S(t, t_0) = \text{tang h} \left(\frac{t-t_0}{\tau_{sh}} \right)^{0,5} \dots\dots\dots(35)$$

- ◆ t_0 : L'âge du béton au début de séchage (jours),
- ◆ t : L'âge du béton (jours),
- ◆ h : Humidité relative (décimal),
- ◆ τ_{sh} : Fonction retrait mi-temps, $\tau_{sh} = K_t (K_s D)^2$, (voir équation 33).

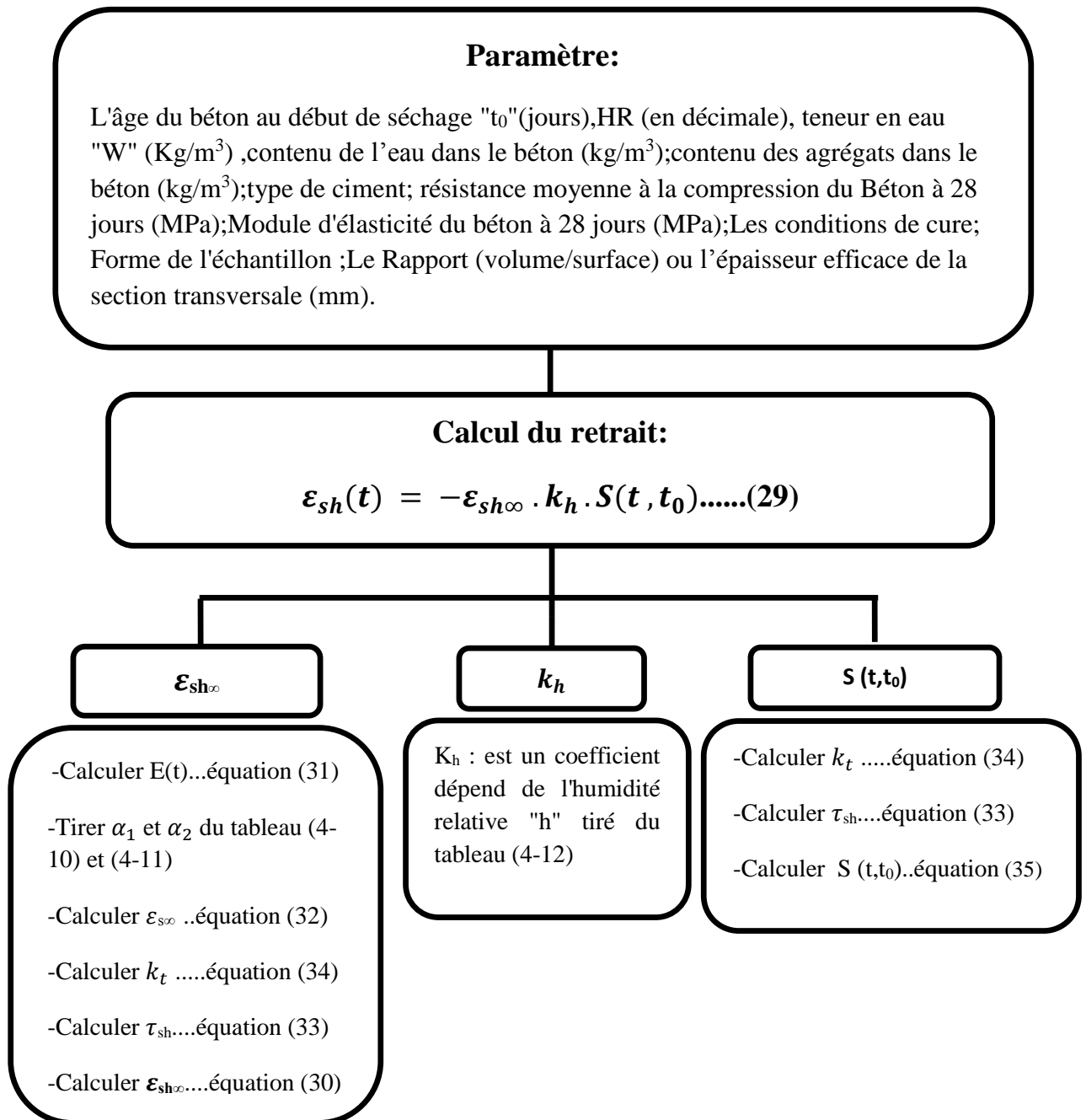


Figure I-4-8 : Organigramme montrant la méthode de calcul du retrait par le modèle B3.

b) Le modèle ACI 209R-92 :

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

L'ACI code 209R-92 a été développé par "**Branson et Christiason**" en 1971, il s'agit d'un modèle purement empirique recommandé par le Comité (American Concrete Institute) ACI 209 (1971) avec des modifications mineures apportées à l'ACI 209R-82 (ACI Comité 2091982), il est incorporé dans ACI 209R-92 (Comité ACI 209 1992), et ré-approuvé en 2008.

Le modèle original de "**Branson et Christiason**" a été développé par le suivi de l'évolution du retrait d'un échantillon de 95 spécimens (cylindres de 150x300 mm), tout d'abord ils ont fixé la déformation de retrait ultime à 800×10^{-6} in. / in. (mm / mm). Cependant, la recherche ultérieure faite par "**Branson et Chen**", qui est basée sur un échantillon avec 356 points de données expérimentales de retrait, ils ont conclu que la déformation de retrait ultime doit être 780×10^{-6} (mm / mm). [**R. Missouri, 2012**]

i) Les paramètres requis:

Pour calculer la déformation de retrait suivant la méthode ACI 209, les paramètres suivants sont exigés :

- ✓ Age du béton au début de séchage, généralement considérée comme l'âge à la fin de la cure humide (jours);
- ✓ La méthode de cure;
- ✓ Humidité relative (hygrométrie) exprimée en décimal;
- ✓ Rapport volume/ surface (mm) ;
- ✓ Ouvrabilité du béton frais (mm) ;
- ✓ Dosage en ciment (kg/m^3) ;
- ✓ Type de ciment,
- ✓ Teneur en air du béton exprimée en décimal,
- ✓ Pourcentage des agrégats fins qui est le rapport (granulats fins/granulats total), en poids.

ii) Calcul du retrait :

La déformation de retrait au temps t est paramétrée par la date de fin de cure du béton (date de début de séchage), par la déformation de retrait ultime, par les paramètres relatifs à l'humidité relative environnementale, par les dimensions de l'élément et par la composition du béton. ∞

La déformation de retrait au temps t (jours), est donnée par l'équation (36), [**CH. Clarke,2009**]

$$\epsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{(t-t_c)^\alpha}{f+(t-t_c)^\alpha} \cdot \epsilon_{shu} \dots\dots(36)$$

- $\epsilon_{sh}(t, t_c)$: Est la déformation dépendant du temps "t" de retrait,
- t : Age du béton (jours),
- t_c : Age du béton au début du retrait (jours),
- $(t - t_c)$: Est la durée de séchage (jours),
- ϵ_{shu} : Le retrait ultime du béton,

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

• $\frac{(t-t_c)^\alpha}{f+(t-t_c)^\alpha}$: Rapport du temp,

f (jours) et α sont des constantes qui définissent le rapport du temps, et qui tient en compte la taille et la forme de l'élément, le **facteur α est pris égale à 1,** " plate-forme hyperbolique", (équation hyperbolique de ROSSE et LORMAN), [ACI 209R-92].

Selon l'ACI, la prédiction du comportement du matériau en fonction du temps (fluage et retrait) se fait dans des conditions standard et conditions non standard, le principe est résumé dans le tableau (4-14). [ACI209.2R,08]

Tableau I-4-14 : Conditions standard telle que définie par l'ACI 209R-92

Facteurs		Variables considérées	Conditions standard	
Béton (fluage et retrait)	<i>Composition du béton</i>	-Le contenu de la pâte de ciment	Type de ciment	Type I et III
		-Rapport (eau/ciment)	Affaissement	70 mm
		- les proportions du mélange	La teneur en air	$\leq 6\%$
		- caractéristiques des granulats	Pourcentage des granulats fins	50%
		- Degré de compactage	Dosage en ciment	279 à 446kg/m ³
	<i>Durcissement initial</i>	Durée de la cure initiale	Cure humide	7 jours
			Cure à vapeur	1 à 3 jours
		la température de cure	Cure humide	23,2 ± 2° C
			Cure vapeur	$\leq 100^\circ$ C
		l'humidité de cure	Humidité relative	$\geq 95\%$
La géométrie d'élément et de l'environnement (fluage et retrait)	<i>Environnement</i>	- température du béton	Température du béton	23,2 ± 2° C
		- Contenu de l'eau en béton	L'humidité relative ambiante	40%
	<i>Géométrie</i>		Rapport Volume/surface ou	V/S= 38 mm
		Taille et forme	L'épaisseur effective	150 mm

Condition standard:

Pour les conditions standards, en l'absence des conditions locales et des données spécifiques de retrait pour les granulats et à une humidité relative ambiante de 40%, la valeur moyenne proposée pour la déformation de **retrait finale** " ϵ_{shu} " est égale à $780 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$.

Donc l'équation (36) devienne :

$$\epsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{(t-t_c)}{f+(t-t_c)} \cdot 780 \cdot 10^{-6} \quad \mu\text{m/mm}.....(37)$$

f : Facteur pris égale à:

$$\left\{ \begin{array}{l} - 35 : \text{Pour 7 jours de cure humide,} \\ - 55 : \text{Pour 1 à 3 jours de cure à vapeur,} \end{array} \right.$$

Le modèle ACI 209 suppose que le retrait à mi-temps est égal à 35 pour la cure humide, (55 pour la cure à vapeur), qui suggère que l'amplitude de retrait atteint la moitié de la valeur finale à 35 (55) jours de séchage.

Donc:

Cure humide: $\epsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{t-t_c}{35+t-t_c} \cdot 780 \times 10^{-6}(38)$

Cure à vapeur : $\epsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{t-t_c}{55+t-t_c} \cdot 780 \times 10^{-6}(39)$

NOTE:

Il faut noter que le rapport du temps ne fait pas de différence entre le retrait de dessiccation, endogène, et de carbonatation. En outre, il est indépendant de la forme et la taille d'élément, parce que f et α sont considérées comme constantes. [ACI209.2R,08]

Condition non standards:

Pour des conditions autres que les conditions standards, l'équation (36) devienne:

$$\epsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{t-t_c}{f+t-t_c} \epsilon_{shu}.....(40)$$

L'effet de la forme et la taille est pris en compte par " f " (jours), donné par l'équation :

$$f = 26,0 e^{(1,42 \times 10^{-2} (V/S))}(41)$$

Avec:

(V/S) : Est le rapport volume sur surface,

* V : Est le volume de l'échantillon en mm³,

* S : La surface de l'échantillon en mm², [R. Missouri, 2012]

✚ **ϵ_{shu}** : La valeur moyenne du retrait ultime (780 x10⁻⁶) doit être modifiée, en la multipliant par des facteurs de correction qui tiennent en compte la composition du béton, la durée de cure et l'humidité relative, comme montré par l'équation (42):

$$\epsilon_{shu} = 780 \times \gamma_{sh} \times 10^{-6} \quad mm/mm \dots(42)$$

Avec :

$$\gamma_{sh} = \gamma_{sh,tc} \cdot \gamma_{sh,RH} \cdot \gamma_{sh,vs} \cdot \gamma_{sh,s} \cdot \gamma_{sh,\psi} \cdot \gamma_{sh,c} \cdot \gamma_{sh,\alpha} \dots\dots (43)$$

Donc :

$$\epsilon_{shu} = 780 \cdot \gamma_{sh,tc} \cdot \gamma_{sh,RH} \cdot \gamma_{sh,vs} \cdot \gamma_{sh,s} \cdot \gamma_{sh,\psi} \cdot \gamma_{sh,c} \cdot \gamma_{sh,\alpha} \cdot 10^{-6} (44)$$

D'ou :

γ_{sh} : Représente le produit cumulé des coefficients de correction suivant :

- $\gamma_{sh,tc}$: Facteur de correction tenant compte de l'effet de la durée de la cure.

- $\gamma_{sh,RH}$: Facteur de correction tenant compte de l'effet de l'humidité relative.

- $\gamma_{sh,vs}$, $\gamma_{sh,s}$, $\gamma_{sh,\psi}$, $\gamma_{sh,c}$, $\gamma_{sh,\alpha}$: Facteurs de correction liés à la composition du béton,

➤ **$\gamma_{sh,tc}$** : *Facteur de correction curatif humide initial* : Dépend de la durée et le type de cure,

➤ Cure humide : Les valeurs de $\gamma_{sh,tc}$ sont résumés dans le tableau (I-4-15) ou obtenues par l'analyse de régression linéaire donné dans l'équation(i),

$$\gamma_{sh,tc} = 1,202 - 0,2337 \log(t_c) \dots(45)$$

➤ Cure à vapeur d'une période de 1 à 3 jours, $\gamma_{sh,tc}=1$.

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

Tableau I-4-15 : Valeurs de $\gamma_{sh,tc}$ pour une cure humide,

Durée de cure humide t_c en jours	$\gamma_{sh,tc}$
1	1.2
3	1.1
7	1.0
14	0.93
28	0.86
90	0.75

➤ $\gamma_{sh,RH}$ *Facteur de correction d'humidité relative ambiante* est donné par :

$$\gamma_{sh,RH} = \begin{cases} 1,40 - 1,02h & \text{pour } 0,40 \leq h \leq 0,80 \\ 3,00 - 3,0h & \text{pour } 0,80 \leq h \leq 1 \end{cases} \dots\dots(46)$$

Où l'humidité relative h est exprimée en décimales.

- Pour une humidité relative inférieure à 40%, la valeur de $\gamma_{sh,RH}$ doit être supérieure à 1,0.
- Pour une humidité relative égale à 100% , $\gamma_{sh,RH} = 0$,ACI ne prédit pas le gonflement.
- *Facteur de correction pour l'effet de la taille de l'élément*: Peut être pris en termes de rapport (V/S) par $\gamma_{sh,VS}$ ou en terme de l'épaisseur moyen (d) par $\gamma_{sh,d}$.
 - $\gamma_{sh,VS}$: Facteur de correction dépendant de la taille de l'élément en termes de rapport (volume/surface), pour les éléments avec un rapport (volume/surface) autre que 38 (conditions standard) :

$$\gamma_{sh,VS} = 1,2e^{\{-0,00472(V/S)\}} \dots\dots(47)$$

Où :

- V : Est le volume de l'échantillon en mm^3
- S : La surface de l'échantillon en mm^2 .

- $\gamma_{sh,d}$: Facteur de correction dépend de la taille de l'élément en terme de l'épaisseur moyenne (d) qui égale quatre fois le rapport (V/S), $d = (4V/S)$
 - V : Est le volume de l'échantillon en mm^3
 - S : La surface de l'échantillon en mm^2 .
 - ✚ Quand ($d < 150 \text{ mm}$): Les facteurs de modification donnés dans le tableau (I-4-16) peuvent être utilisés.

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

Tableau I-4-16 : Les valeurs de $\gamma_{sh,d}$ en fonction de (d) selon ACI 209

L'épaisseur effective de l'élément d (mm)	facteurs de retrait $\gamma_{sh,d}$
51	1,35
76	1,25
102	1,17
127	1,08
152	1,00

✚ Quand ($37,5 \text{ mm} < d < 380 \text{ mm}$) : Les équations suivantes (48) et (49) sont utilisées:

*si $(t - t_c) \leq 1$ année :

$$\begin{cases} \gamma_{sh,d} = 1,23 - 0,0015d \\ \gamma_{sh,d} = 1,23 - 0,006(V/S) \end{cases} \dots\dots(48)$$

*si $(t - t_c) > 1$ année :

$$\begin{cases} \gamma_{sh,d} = 1,17 - 0,00114d \\ \gamma_{sh,d} = 1,17 - 0,00456(V/S) \end{cases} \dots\dots(49)$$

➤ $\gamma_{sh,vs}$, $\gamma_{sh,s}$, $\gamma_{sh,\psi}$, $\gamma_{sh,c}$, $\gamma_{sh,\alpha}$: Sont des facteurs de correction liés à la composition du béton,

✚ $\gamma_{sh,s}$: Coefficient tenant compte l'ouvrabilité du béton frais.

$$\gamma_{sh,s} = 0,89 + 0,00161 s \dots\dots(50)$$

s : Est l'affaissement du béton frais (mm).

✚ $\gamma_{sh,\psi}$: Coefficient tenant compte le pourcentage des agrégats fin dans le béton.

$$\begin{cases} \gamma_{sh,\psi} = 0,30 + 0,014\psi & \text{pour } \psi \leq 50\% \\ \gamma_{sh,\psi} = 0,90 + 0,002\psi & \text{pour } \psi \geq 50\% \end{cases} \quad (51)$$

ψ : Le rapport des granulats fins/granulats totale en poids, exprimée en pourcentage.

✚ $\gamma_{sh,c}$: Coefficient tenant compte le dosage de ciment dans le béton :

$$\gamma_{sh,c} = 0,75 + 0,00061 C \dots\dots(52)$$

C : Est le dosage en ciment en kg/m^3 .

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

✚ $\gamma_{sh,\alpha}$: Coefficient tenant compte de l'air occlus dans le béton.

$$\gamma_{sh,\psi} = 0,95 + 0,008\alpha \geq 1 \dots(53)$$

α : Est le contenu en air en pourcent.

L'un des avantages du modèle ACI 209, c'est qu'il a une large gamme de facteurs de correction qui peuvent être facilement appliqués pour l'équation de prédiction.

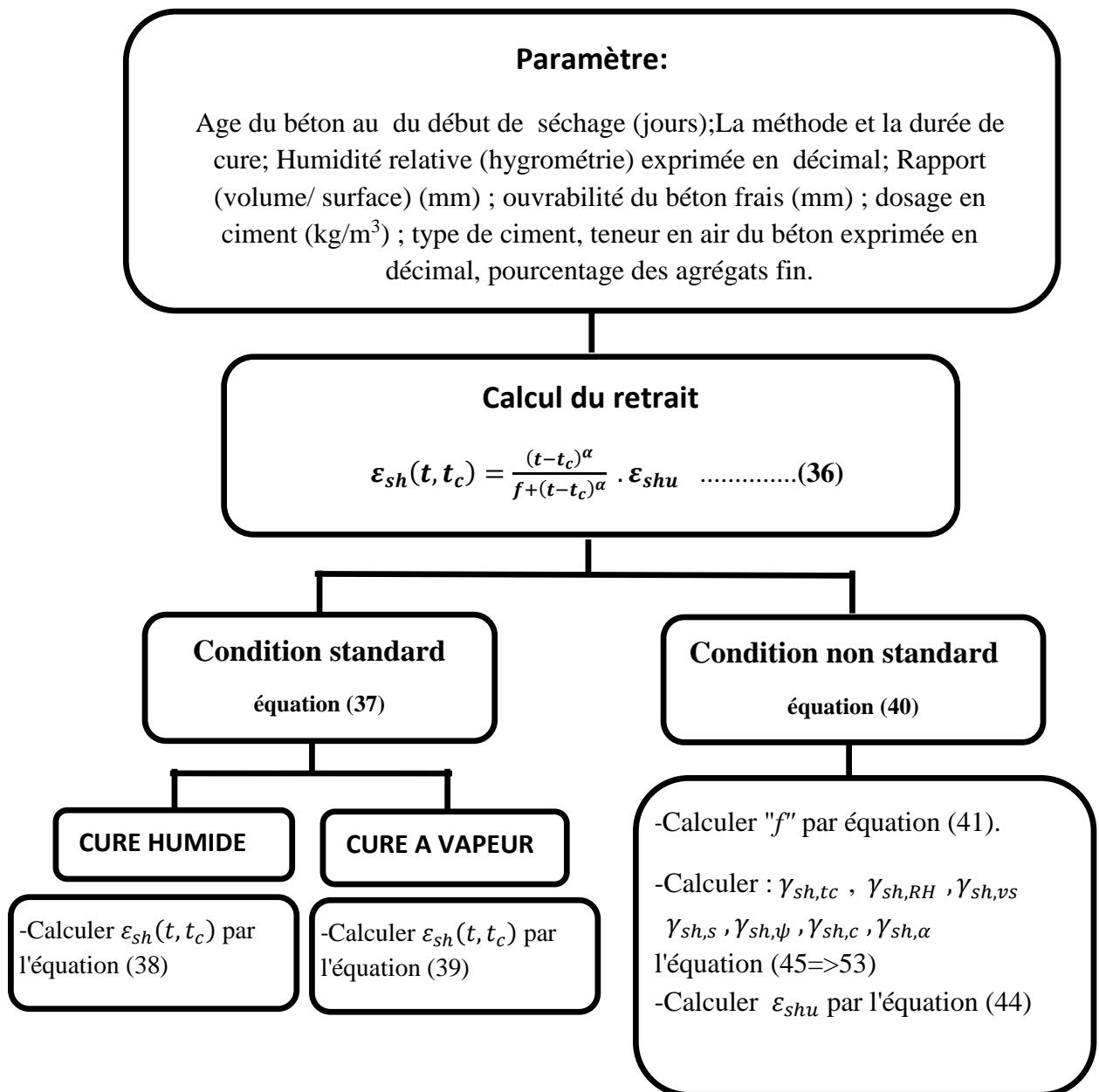


Figure I-4-9 : Organigramme montrant la méthode de calcul du retrait par le modèle ACI-209.

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

c) GL 2000 Gardner-Lockman :

Ce modèle a été développé par "Gardener et Lockman" en 2001, c'est une modification du modèle d'Atlanta 97 qui est proposé par "Gardner et Zhao", il était publié dans le Journal matériaux ACI sous le titre "Des dispositions de conception pour le séchage, le retrait et le fluage du béton".

La prédiction du fluage et de retrait nécessite la résistance à 28 jours du béton, la taille de l'élément, et l'humidité relative.

Ce modèle ne prend pas en compte l'effet des adjuvants chimiques, minéraux incorporés dans le béton, et la méthode de cure.

Si les valeurs expérimentales ne sont pas disponibles, le module d'élasticité et le développement de la résistance avec le temps peuvent être calculés en utilisant les mêmes équations qu'Atlanta 97.

i) Limites d'application du modèle :

Tableau I-4-17: Limites d'application du modèle GL2000.

Le rapport Eau/ciment (W/C) [en poids]	$0,4 \leq (W/C) \leq 0,6$
Le rapport volume/surface (v/s) [en mm]	$(v/s) \geq 19$
La résistance caractéristique [MPa]	$16 \leq f_c \leq 82$
Humidité relative	$0,2 \leq HR \leq 1$

ii) Paramètres requis:

Pour calculer le retrait suivant le modèle GL2000, les paramètres suivants sont exigés :

- ✓ Age du béton au début de séchage (jours);
- ✓ Type de ciment;
- ✓ Résistance moyenne à la compression de béton à 28 jours (MPa);
- ✓ Humidité relative (Hygrométrie) exprimée en décimales;
- ✓ Rapport (volume/ surface) (millimètre).

iii) Calcul du retrait :

L'équation de retrait du modèle "GL2000" est simplifiée par rapport à celle du modèle "Atlanta 97".

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{shu} \beta(h) \beta(t - t_c) \dots \dots \dots (54)$$

- ε_{shu} : Déformation de retrait ultime;
- $\varepsilon_{sh}(t, t_c)$: Déformation de retrait;
- $\beta(h)$: Est le terme de correction pour l'effet de l'humidité;

PARTIE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
CHAPITRE I-4 : ETUDE THEORIQUE DES MODELES DE PREDICTION DE RETRAIT

- $\beta(t - t_c)$: Est le terme de correction pour l'effet du temps.

✚ **Calcul détaillé de ϵ_{shu} :**

$$\epsilon_{shu} = 1000 \cdot k \cdot \left(\frac{30}{f_{cm28}}\right)^{1/2} \cdot 10^{-6} \dots\dots\dots(55)$$

- ◆ ϵ_{shu} : Déformation de retrait ultime;
- ◆ f_{cm28} : Résistance moyenne à 28 jours (MPa);
- ◆ k : Facteur tenant compte de l'effet du type de ciment sur le retrait; se reporter au tableau (4-18).

Tableau I-4-18: Valeurs de k en fonction du type de ciment selon GL2000.

type de ciment	k
type I	1
type II	0,75
type III	1,15

✚ **Calcul détaillé de $\beta(h)$:**

$$\beta_H = (1 - 1,18 RH^4) \dots\dots\dots(56)$$

- ◆ RH: Humidité relative exprimée en décimale;

✚ **Calcul détaillé de $\beta(t)$:**

$$\beta(t - t_c) = \left(\frac{t - t_c}{t - t_c + 0,15\left(\frac{V}{S}\right)^2}\right)^{0.5} \dots\dots\dots(57)$$

Ou:

- ◆ t : Est l'âge du béton (jours) à l'instant considéré ;
- ◆ t_c : Est l'âge du béton au début de séchage (jours) ;
- ◆ $(t - t_c)$: Est la durée de séchage (jours).
- ◆ (V/S) : Est le rapport volume sur surface,

V : Est le volume de l'échantillon en mm³,
 S : La surface de l'échantillon en mm²

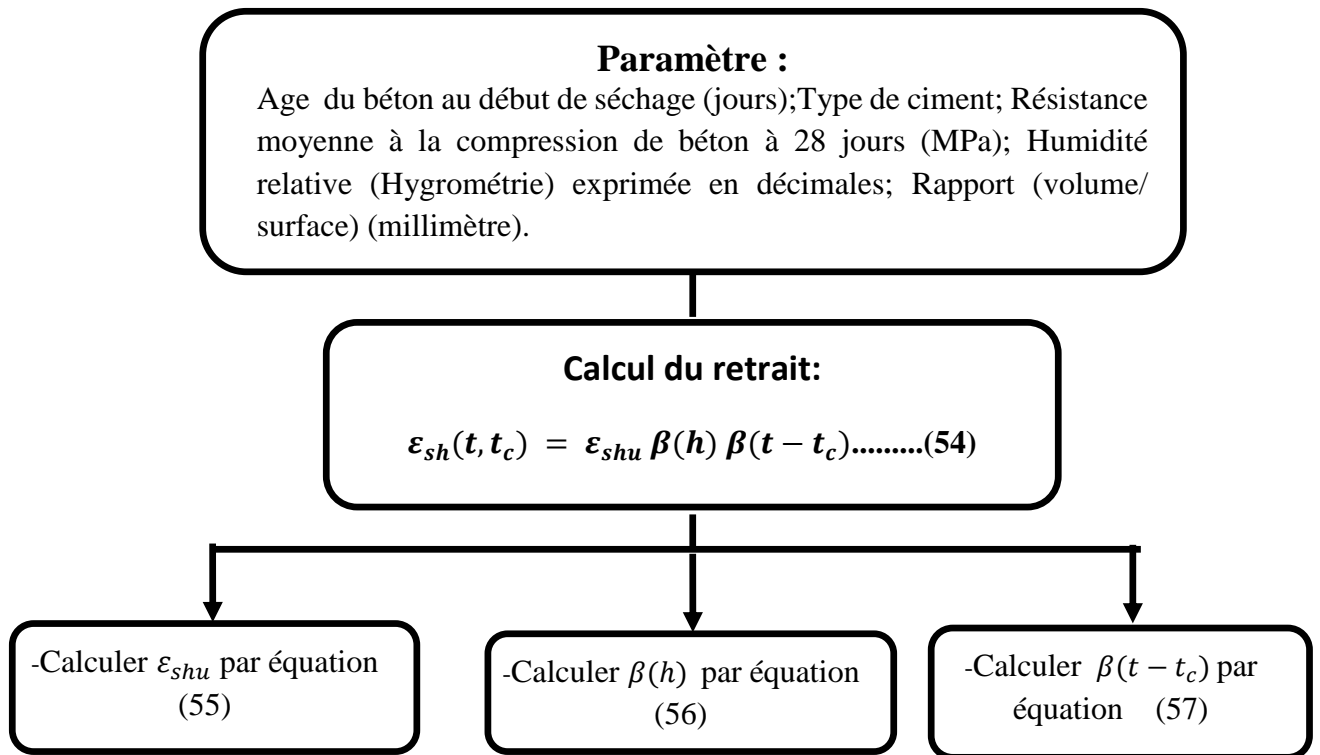


Figure I-4-10 : Organigramme montrant la méthode de calcul du retrait selon le modèle GL2000.

Conclusion de la partie I:

Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives au comportement des BAP, leurs caractéristiques et leur performance mécanique.

Afin de mener au mieux cette étude, une partie a été consacrée à la présentation des constituants du BAP pour comprendre leurs rôles joués, aux méthodes et les spécificités de sa formulation (volume de pâte important, dosage élève en additions minérales, utilisation du superplastifiant, rapport G/S « Gravillons/Sable » proche de 1, . . .) ainsi qu'aux tests de caractérisation à l'état frais (essais recommandés par :étalement, la boîte en L et la stabilité au tamis) et durci (résistance à la compression et à la traction par flexion).

Nous présentons les différents types de déformations qui peuvent se développer dans le béton. Ces déformations sont séparées en deux grandes familles liées à l'existence ou non d'un chargement mécanique en détaillant les mécanismes à l'origine de ces phénomènes et en précisant les paramètres influents.

Le retrait est une déformation qui se produit en l'absence de chargement extérieur, nous distinguons le retrait endogène et le retrait de dessiccation. Le premier représente le comportement au cœur du béton puisqu'il est obtenu en empêchant tout échange hydrique avec l'extérieur. Le deuxième prend en compte le gradient hydrique entre l'intérieur de l'éprouvette et l'extérieur.

Nous clôturons cette partie par une présentation des modèles de prédiction du retrait du béton qui sont récemment utilisés en Europe (CEB MC 90, CEB MC 90-99 Eurocode 2) et aux Etats-Unis (ACI 209, B3, GL2000), en spécifiant les paramètres pris ou non en compte par chaque modèle.

PARTIE II :
ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

II-1-1 Introduction:

Cette étude est inscrite dans le cadre de la recherche sur l'évolution des performances des bétons autoplaçants à base des matériaux locaux sous diverses conditions.

Nous allons, dans ce chapitre, et au travers ses différents paragraphes, mettre en exergue les matériaux utilisés pour formuler un béton autoplaçant «BAP», sa confection, ses caractéristiques, les essais auxquels il doit être soumis et de montrer l'évolution des variations dimensionnelles et pondérales de ces bétons.

Deux rapports de (F/L) et trois finesses de fillers ont été sélectionnés pour la suite de l'étude des bétons additionnés de fillers calcaires.

- Nature du béton : Béton autoplaçant (BAP),
- Teneur de fines : F/L= (fillers/fillers+ciment), F/L=(0,1) et F/L=(0,2).
- Finesse de calcaire: UF5, UF10, F20.

Le programme expérimental se compose de:

- Essai de caractérisation a l'état frais,
- Essais pour déterminer la résistance en compression f_c des bétons à 7 jours et à 28 jours ;
- Essais pour déterminer la résistance en traction f_t des bétons à 7 jours et à 28 jours;
- Essai de l'étude du retrait et de la perte de masse.

II-1-2 Matériaux utilisés :

Le comportement du béton est le résultat d'une interaction complexe entre ces divers constituants, c'est la raison pour laquelle nous commençons ce chapitre par une présentation des matériaux mis en œuvre pour confectionner le mélange et la proportion avec laquelle ils entrent dans la composition.

Le béton autoplaçant est constitué de ciment, d'eau, de granulats (sable et gravier), ajouts (fillers calcaires) et éventuellement d'adjuvant. Les caractéristiques physiques et chimiques de ces matériaux d'étude sont également présentées pour analyser et justifier ultérieurement les résultats d'essais

Le choix s'est porté sur six formulations fabriquées à partir de :

- Ciment: CPJ 42.5 (CEMII /A) provienne de la cimenterie d'EL -Hamma Bouziane,
- Fillers calcaire: UF5, UF10, UF20, de la carrière géante (ENG) à El-khroub,
- Granulats (sable et gravier): carrière Hedna de Ain Smara, Constantine,
- Adjuvant: un superplastifiant Medaplast SP4O, source, Granitex, Alger.
- Eau: robinet du laboratoire, Matériaux et durabilité de construction de l'université Constantine 1.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

II-1-2-1 Ciments:

Le ciment utilisé pour toutes les bétons a été le ciment CEMII /A (CPJ 42.5), ciment provient d'une unique livraison de la cimenterie d'EL-Hamma Bouziane (région de Constantine). Ce ciment, dont l'ajout est principalement constitué de calcaire, est conforme à la norme Algérienne NA 442, sa surface spécifique Blaine est de 3891 cm²/g et sa densité de 3,1.



Figure II-1-1: Ciment utilisé CPJ 42,5

Les différentes caractéristiques que se soit physiques, chimiques ou mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'usine même. Les différentes caractéristiques sont présentées dans les tableaux (II-1-1) et (II-1-2).

Tableau II-1-1 : Composition minéralogique du clinker.

Eléments	Abréviation (%)	Teneur massique
Silicate tri calcique	C ₃ S	56,60
Silicate bi calcique	C ₂ S	22,98
Sluminate tricalcique	C ₃ A	9,87
Slummino-ferrite tétracalcique	C ₄ AF	8,25

Tableau II-1-2 : Composition chimique du clinker.

Composition chimique	Teneur massique (%)
SiO₂	27,83
Al₂O₃	6,21
Fe₂O₃	3,12
CaO	57,22
MgO	0,94
SO₃	2,02
Na₂O	/
K₂O	/
chlorures	0,00
CaO libre	0,88
Résidus insolubles	2,28
P.A.F	2,41

II-1-2-2 Les fillers calcaires « FC »:

Les additions que nous avons utilisées dans notre recherche sont des fillers calcaires, éléments qui représentent des dimensions inférieures à 80 μ m. Elles proviennent de la carrière géante (ENG) d'El-khroub, ce gisement occupe la partie sud ouest du massif Oum Settas au sud-est de Constantine, il est constitué de calcaire d'origine néritique caractérisé par une grande pureté chimique, une blancheur élevée.

Les fillers calcaire ont une haute teneur en calcaire, une richesse en calcium, une teneur en CaCO₃ supérieure à 98%, une masse volumique réelle de 2600 Kg/m³ et une surface spécifique de Blaine de 3460 cm²/g.

Pour la réalisation de ce travail nous avons choisi d'utiliser trois types de fillers calcaires, qui se différencient par leurs finesses, notés : UF5, UF10, F20.

Les avantages que présente l'utilisation de notre filler calcaire sont les suivants :

- Remplissage granulaire grâce à leur faible dimension,
- Augmentation de la résistance du béton par diminution de la porosité du béton frais,
- Diminution du dosage en ciment pour une résistance donnée (substitution d'une partie de ciment par fillers),
- Limitation du ressuyage,
- Augmentation de la cohésion,
- Un faible coût.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

Les différentes caractéristiques que ce soit physiques ou chimiques du fillers utilisés sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de la carrière même et ils sont regroupées dans les tableaux (II-1-3) et (II-1-4).

Tableau II-1-3: Analyse physique de l'addition calcaire.

Caractéristiques	UF5	UF10	UF20
Aspect	Poudre	poudre	poudre
Dureté (Mohs)	3	3	3
Poids spécifique	2,7	2,7	2,7
Densité apparente non tassée (g/cm ³)	0,81	0,90	1,09
Diamètre médian	7 μm	10 μm	23 μm

Le diamètre médian des grains des fillers «diamètre pour lequel 50% des fillers sont inférieurs ».

Tableau II-1-4:Analyse chimique de l'addition calcaire.

Caractéristiques	UF5 (La teneur en %)	UF10 (La teneur en %)	UF20 (La teneur en %)
CaCO ₃	99	99	99
CaO	55,88	55,88	55,88
SiO ₂	0,01	0,01	0,01
Na ₂ O	0,01	0,01	0,01
Fe ₂ O ₃	0,01	0,01	0,01
Al ₂ O ₃	0,01	0,01	0,01
MgO	0,14	0,14	0,14
SO ₃ (soluble dans l'eau)	0,0021	0,0021	0,0021
SO ₃ (soluble dans l'acide)	0,1115	0,1115	0,1115
PH	9,24	9,24	9,24

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

D'un point de vue de la composition minéralogique, la norme NF P 18 508 impose un dosage en calcite supérieur à 62%, et nous retrouvons des fillers couvrant cette gamme (99%).



Figure II-1-2: Les fillers calcaires utilisés (UF5, UF10, F20).

a)UF5: Pour les propriétés morphologiques du fillers calcaires UF5, le diamètre statistique moyen des grains des fillers «diamètre pour lequel 50% des fillers sont inférieurs » est de l'ordre de 7 μm . (99% des éléments du fillers présentent un diamètre inférieur à 20 μm , et 12% un diamètre inférieur à 3 μm).

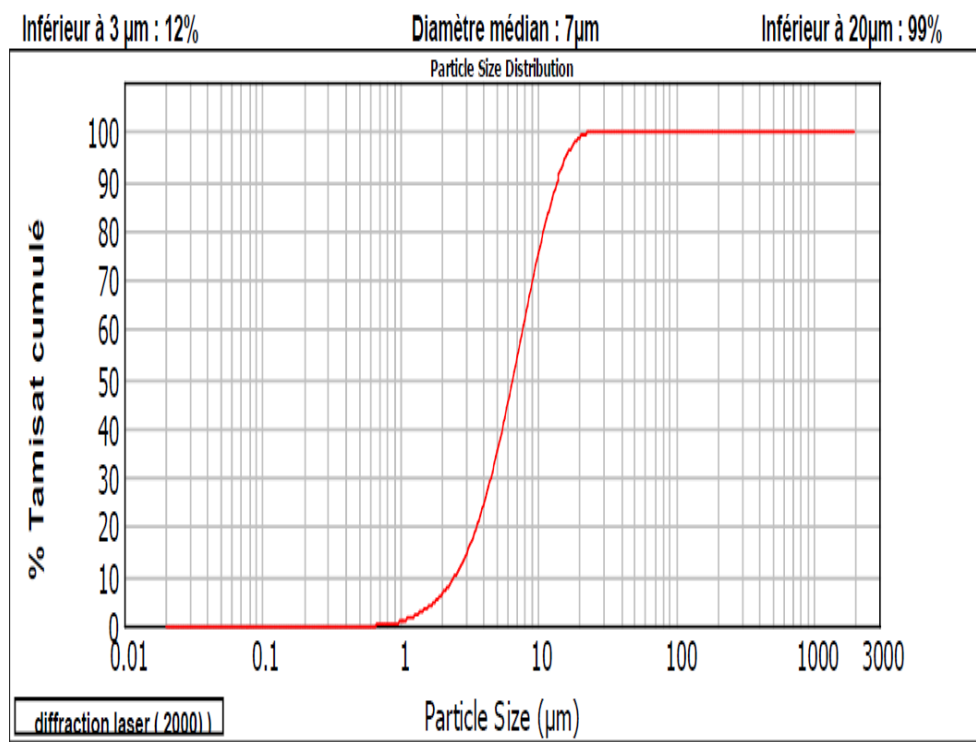


Figure II-1-3: Répartition granulaire d'UF5.

b) UF10: Pour les propriétés morphologiques du fillers calcaires UF10, le diamètre statistique moyen des grains des fillers «diamètre pour lequel 50% des fillers sont inférieurs » est de l'ordre de 10 μm . (99% des éléments du fillers présentent un diamètre inférieur à 40 μm , et 21% un diamètre inférieur à 5 μm).

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

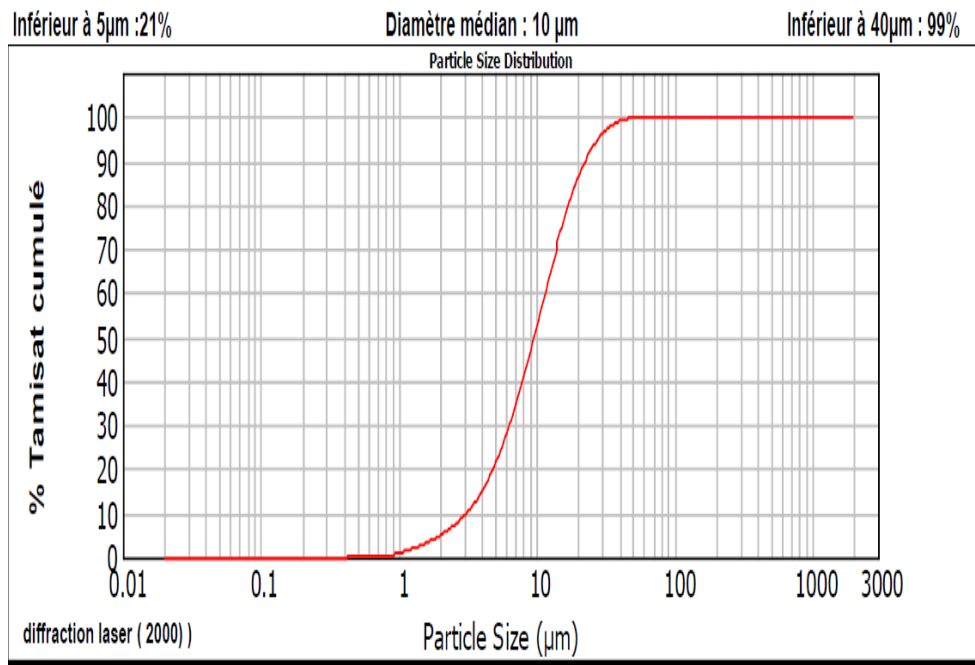


Figure II-1-4: Répartition granulaire d'UF10.

c)F20: Pour les propriétés morphologiques du fillers calcaires F20, le diamètre statistiques moyen des grains des fillers «diamètre pour lequel 50% des fillers sont inférieurs » est de l'ordre de 23µm. (97% des éléments du fillers présentent un diamètre inférieur à 200µm, et 15% un diamètre inférieur à 10µm).

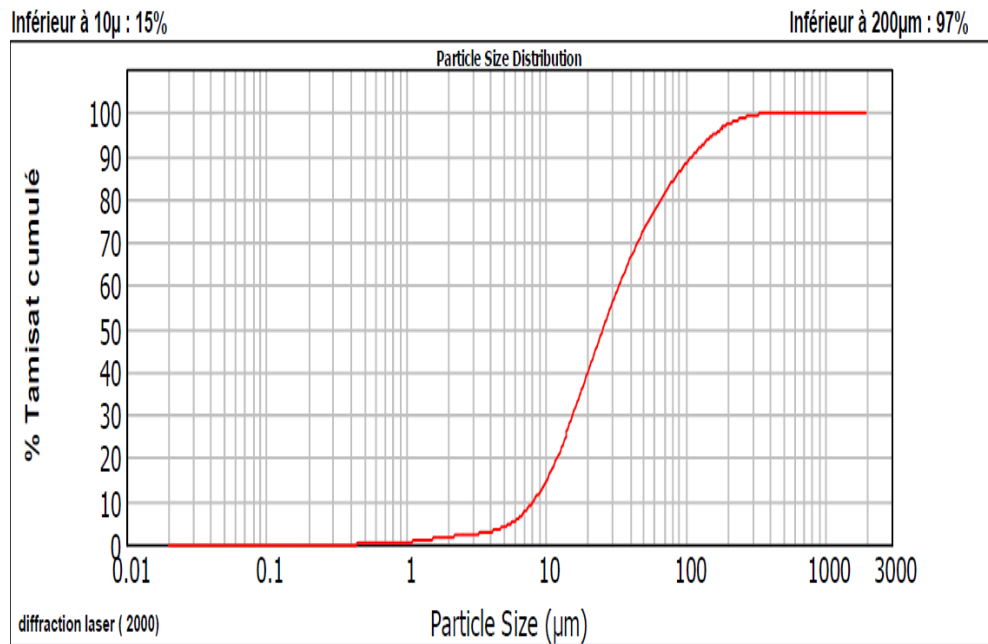


Figure II-1-5: Répartition granulaire de F20.

II-1-2-3 Les granulats :

Les granulats sont d'origine naturelle concassés calcaires proviennent de la carrière carrière Hedna de Ain Smara, Constantine. De cette carrière nous avons pu commander

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

et obtenir trois classes granulaires délivrées sous les appellations commerciales suivantes :

- Sable (0/4),
- Gravier (4/8) et (8/16).

Les normes NFP 18-101 D NF P18-541 définissent les caractéristiques des granulats pouvant être utilisés pour la confection des bétons.



Figure II-1-6: Les granulats "Sable et gravier".

Les différentes caractéristiques que se soit physiques ou chimiques des granulats utilisés sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires carrière même.

Les bétons autoplaçants doivent satisfaire un bon écoulement, quelque soient les densités de ferrailage, c'est pour cette raison que le diamètre maximal des granulats est généralement inférieur à 20 mm [AFGC, 02].

a) Sable 0/4:

Le sable utilisé pour cette étude est de classe granulaire (0/4) concassé, ayant une densité de 2,67 et un module de finesse de 2.9, ce qui correspond à un sable possédant une granularité courante et avec une bonne proportion d'éléments fins.

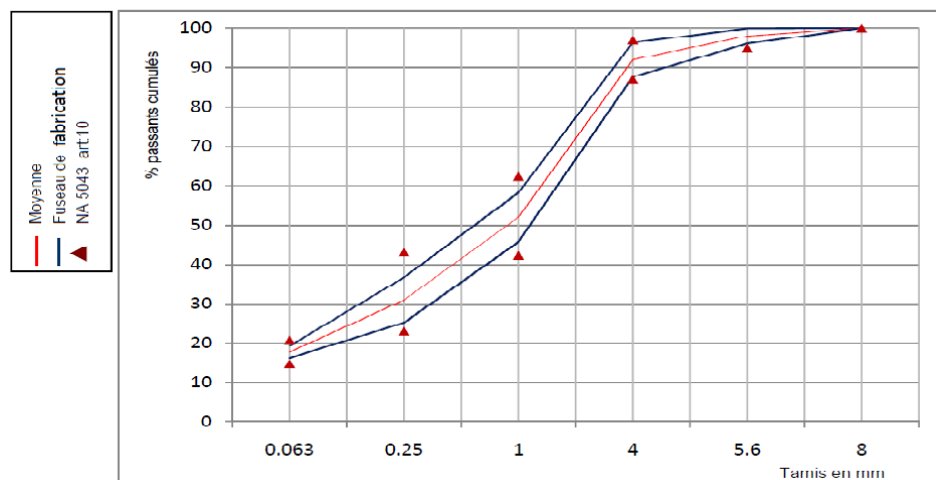


Figure II-1-7: Courbe granulométrique du sable.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

b)Gravier de classe (4/8) et (8/16):

Les graviers de classe granulaire (4/8) et (8/16) issus de concassage des roches calcaires, ils ont une densité de 2,7.

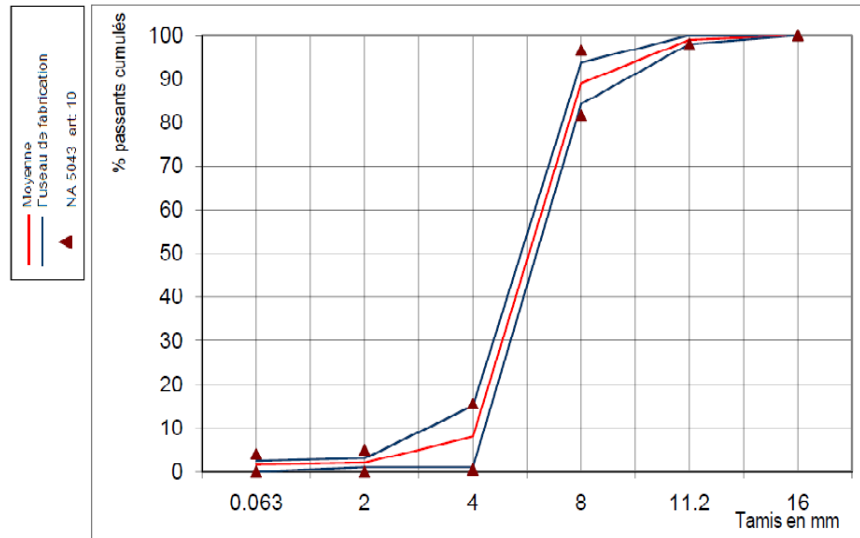


Figure II-1-8 : Courbe granulométrique du Gravier (4/8).

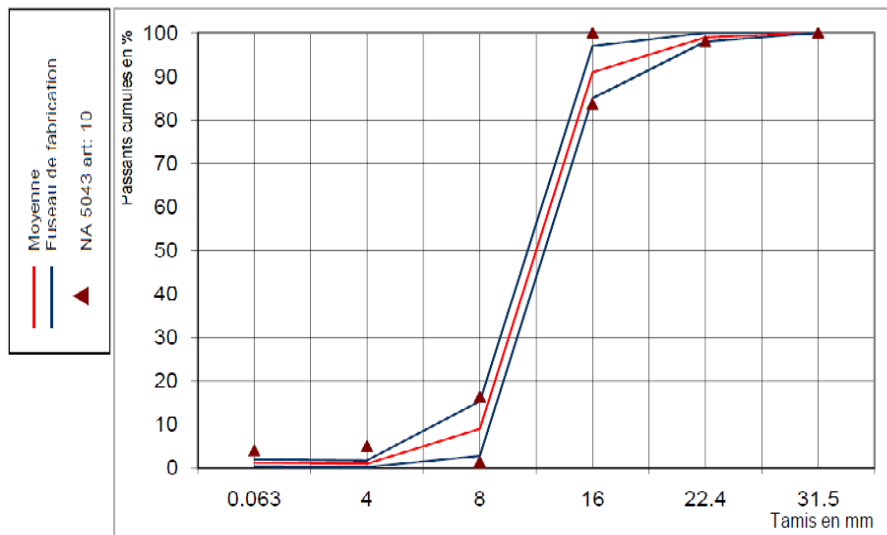


Figure II-1-9: Courbe granulométrique du Gravier(8/16).

II-1-2-4 Eau:

L'eau utilisée dans notre cas est l'eau de robinet, provenant de la source Fesguia qui alimente notre laboratoire. Nous avons soumis un échantillon de cette eau à une analyse chimique dont les résultats recueillis sont présentés au dans le tableau II-1-5.

Les résultats obtenus répondent aux prescriptions de la norme NF P 18-303 relative à la concentration en matières en suspension et sels dissous.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

Tableau II-1-5: Les résultats de l'analyse chimique effectuée sur l'eau.

Echantillons	Concentrations
Matière en suspension	Traces
Sels dissous	1470
Sulfates (SO_4^{2-})	413,56
Chlorures (Cl^-)	298,2
PH	7,9
Calcium (Ca^{+2})	36
Magnésium (Mg^{+2})	60
Bicarbonates (HCO_3^-)	27
Carbonates	3,5
Température ($^{\circ}\text{C}$)	19

Toute eau du réseau public d'eau potable convient à la fabrication de béton autoplaçant, l'eau intervient à toutes les étapes de la vie du matériau pour ses propriétés physico chimiques et elle doit avoir des qualités nécessaires pour ne pas influencer le temps de durcissement du béton et ne pas corroder les armatures d'acier, l'eau potable est donc recommandée.

La quantité d'eau est strictement contrôlée par le rapport (Eau/Ciment) dans les composants des bétons.

L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles :

- une fonction physique qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide,
- une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation et donc les résistances mécaniques.

Mais l'eau qui reste en excès dans les pores du matériau peut présenter aussi un caractère néfaste ; elle est responsable du :

- ressuage,
- retrait de dessiccation,
- fluage,
- en cas du gel ou si elle contient des agents agressifs, elle peut être facteur de dégradation des structures.

II-1-2-5 Adjuvant:

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égales à 5% du poids de ciment. Il permet d'améliorer certaines de ses propriétés,

Dans notre étude, nous avons utilisé l'adjuvant MEDAPLAST SP40, haut réducteur d'eau à base de polycarboxylates modifiés pour haute résistance mécanique, qui se présente sous la forme d'un liquide marron non chloré.

MEDAPLAST SP40 permet d'obtenir des bétons plastiques ayant de fortes résistances mécaniques à court et à long terme et de diminuer considérablement la teneur en eau du béton, il est ajouté avec un dosage de 0,3 à 1,5 % du poids de liant selon les performances recherchées, soit, en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

Les caractéristiques physiques et chimiques sont regroupées dans le tableau suivant:

Tableau II-1-6 : Caractéristiques du MEDAPLAST SP40.

Caractéristiques	MEDAPLAST SP40
Forme	Liquide
Couleur	Marron
PH	4,7 ± 1
Densité	1,040 ± 0,015
Teneur en chlore	< 0.1%
Teneur en Na ₂ O	< 0.5%

II-1-3 Propriétés étudiées :

Pour chacune des compositions énumérées dans le tableau, nous avons réalisé expérimentalement l'étude des propriétés suivantes :

- 1- Les essais de caractérisation à l'état frais (l'étalement, la boîte en L, la stabilité au tamis, essai de V-funnel, air occlus, densité).
- 2- La résistance à la compression à 7et 28 jours,
- 3- La résistance à la traction par flexion à 7et 28 jours,
- 4- La variation dimensionnelle et pondérale (retrait et perte en masse) jusqu'à 90 jours.

II-1-4 Programme expérimental:

Notre objectif est de formuler des bétons autoplaçants fluides à base de matériaux locaux, comme le stipulent les normes au cahier des charges.

La conception des bétons et des essais ont été réalisés au sein du Laboratoire des Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de l'université Constantine 1. Tous les

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

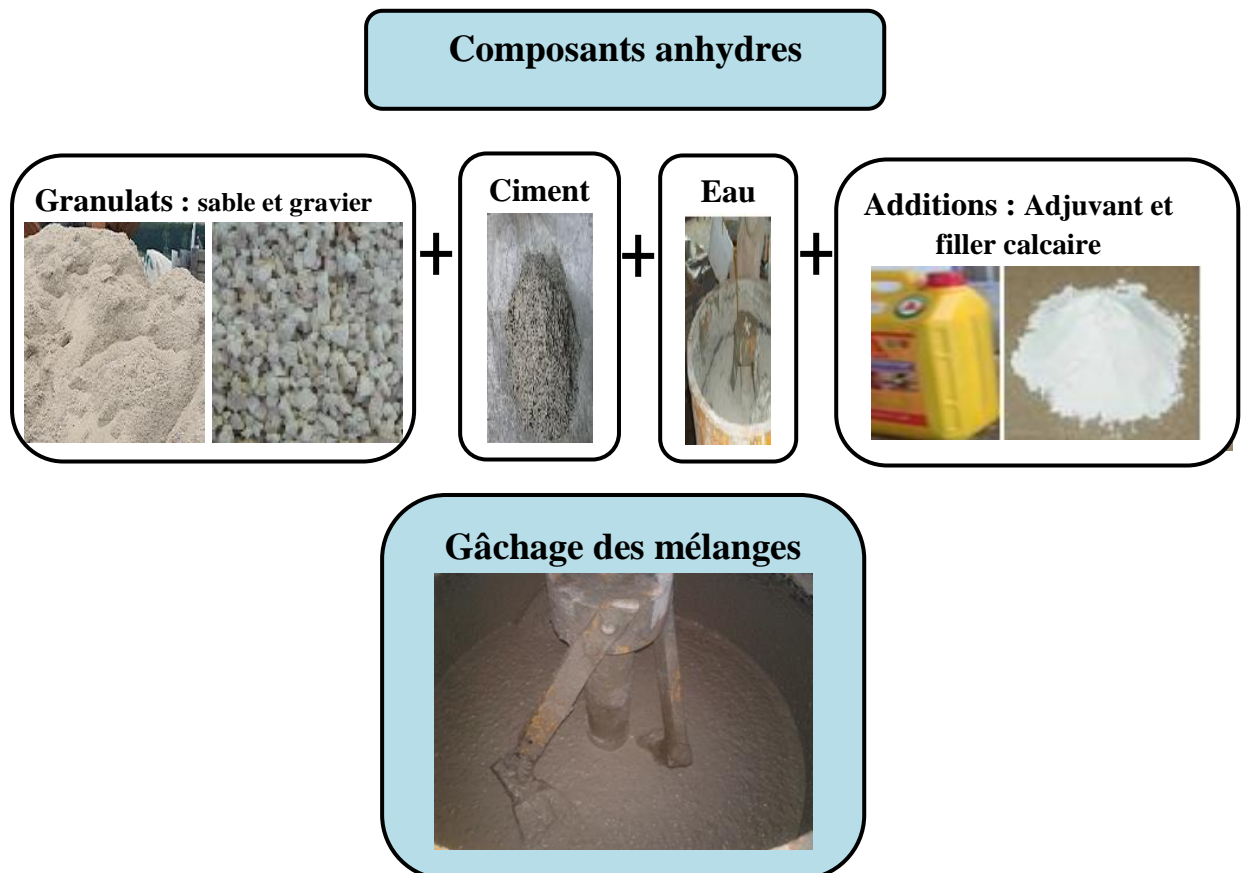
essais normalisés ont été effectués dans le cadre des normes AFNOR (et leurs équivalentes de Normes Algériennes NA).

Dans cette recherche, nous allons mener une étude expérimentale sur les variations pondérales et dimensionnelles des BAP, en se basant sur l'influence des paramètres de compositions (le rapport filler/liant, la finesse du fillers calcaire) et de conservation.

De nombreuses mesures ont été effectuées, pour la caractérisation des BAP à l'état frais (l'étalement, la boîte en L'essai de V-funnel, la stabilité au tamis, air occlus, densité). A l'état durci, une caractérisation classique des mélanges (résistances mécaniques : à la compression sur des éprouvettes cylindriques (16x32) cm², et à la traction par flexion sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm³), sous des conditions de conservation de (T=20 ±2 c°), et (HR=95 ±5%), jusqu'à l'âge d'écrasement de 7 jours et 28 jours.

Compte tenu de l'influence considérable de l'humidité relative sur la cinétique du retrait (gonflement) et de perte (gain) en masse, nous avons intégré ce paramètre dans notre étude, les échantillons ont été soumis à différentes humidité imposées tout au long de la durée des essais, les éprouvettes séchant à l'air libre pour la mesure du retrait total (HR=50±5), les éprouvettes isolées pour la mesure du retrait endogène(HR=90±5), et les éprouvettes conservées dans l'eau pour mesurer le gonflement (immérgé dans l'eau).

L'organigramme suivant de la figure II-2-10 résumant le travail expérimental mené dans cette étude :



**Essai de caractérisation des BAP
à l'état frais**

Essai d'étalement



**Essai de la boîte
en L**



Essai de V-funnel



**Essai de stabilité
au tamis**



Confection des éprouvettes

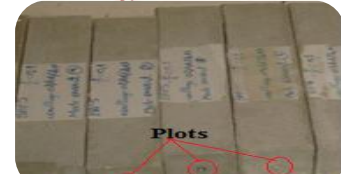
**Eprouvettes cylindriques
(16x32) cm²**



**Eprouvettes prismatiques
(7x7x28) cm³**



**Eprouvettes prismatiques
(7x7x28) cm³ munies de plots**



**Essai de caractérisation des
BAP à l'état durci**

**Essai de compression sur cylindres
(16X32) cm³ à 7 et 28 jours**



**Essai de compression sur prismes
(7x7x28) cm³ à 7 et 28 jours**



**Etude des variations
dimensionnelles et pondérales**

Mesure du retrait (gonflement) et de la perte (gain) en masse en trois modes de conservation à l'aide d'un rétractomètre et une balance.

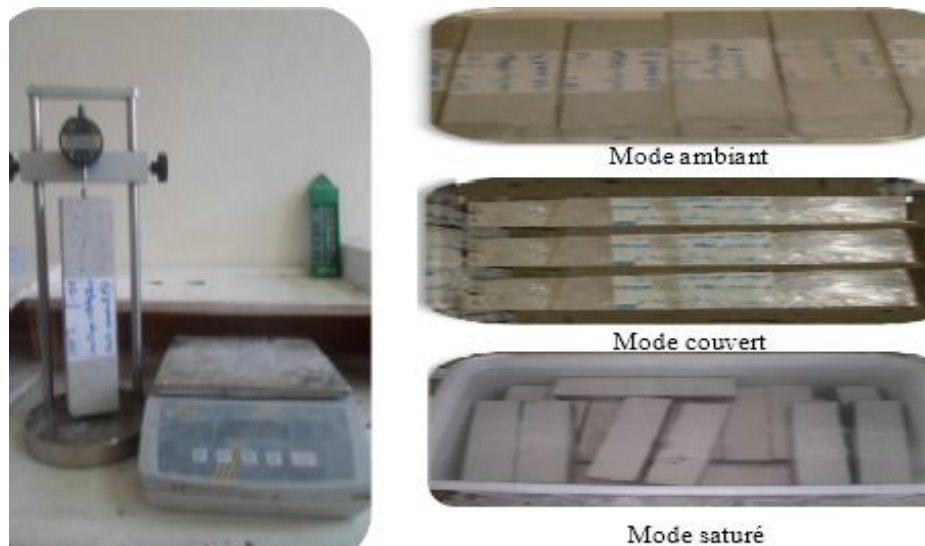


Figure II-1-10: Organigramme des principales étapes de l'étude expérimentale.

II-1-4-1 Formulation du béton :

Les bétons sont bien plus qu'un mélange de sable, gravier, ciment et eau, durcis dans un moule, c'est un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Une attention particulière et une connaissance approfondie sont nécessaires pour formuler un béton de qualité.

Nos bétons ont été formulés selon l'approche japonaise grâce à sa simplicité, elle ne nécessite pas des logiciels (qui ne sont pas disponibles). C'est une méthode empirique purement expérimentale, qui consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite à procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton les meilleures performances [Okamura, 2000].

Afin d'évaluer l'apport de chacun des paramètres de composition (la finesse de calcaire et le rapport filler/liant), l'étude des mélange a été conduite en conservant constant le squelette granulaire et le liant (filler+ciment), l'addition minérale (filler calcaire) a été introduite en substitution massique de 10% et 20% du liant, les quantités d'eau et du superplastifiant des BAP ont été ajustées lors des gâchées d'essai afin d'obtenir un étalement désiré ainsi qu'un aspect homogène (comme préconisé par les recommandations pour un béton autoplaçant)

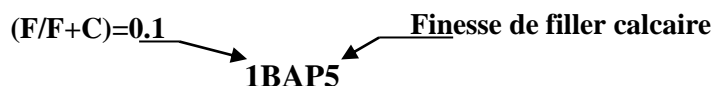
Les deux séries de mélanges choisies dans notre étude expérimentale sont décrites comme suit:

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

La Première: comporte trois béton autoplaçant avec un rapport ($F/L=0.1$) et qui se différencie par la finesse de filler de calcaire (UF5, UF10, F20).

La Deuxième: comporte trois béton autoplaçant avec un rapport ($F/L=0.2$) et qui se différencie par la finesse de filler de calcaire (UF5, UF10, F20),

Afin de faciliter la désignation des bétons de l'étude, nous avons affecté à chacune un code :



F= Filler calcaire,

C= Ciment,

L= Liant=F+C = Ciment+Fillers calcaire.

La nomenclature adoptée concernant les différents bétons est récapitulé dans le tableau suivant:

Tableau II-1-7: Les différents bétons et leurs désignations.

Différentes compositions utilisées dans la recherche		
N°d'ordre	Notations	Désignations de BAP
1	1BAP 5	Béton autoplaçant avec ($F/F+C=0,1$) et un filler calcaire UF5
2	1BAP 10	Béton autoplaçant avec ($F/F+C=0,1$) et un filler calcaire UF10
3	1BAP 20	Béton autoplaçant avec ($F/F+C=0,1$) et un filler calcaire UF20
4	2BAP 5	Béton autoplaçant avec ($F/F+C=0,2$) et un filler calcaire UF5
5	2BAP 10	Béton autoplaçant avec ($F/F+C=0,2$) et un filler calcaire UF10
6	2BAP 20	Béton autoplaçant avec ($F/F+C=0,2$) et un filler calcaire UF20

Le tableau II-1-8 récapitule les différentes compositions et leur dosage pour un mètre cube de mélange.

Tableau II-1-8: Composition d'un mètre cube des mélanges.

	Ciment (Kg)	Filler (Kg)	Liant (Kg)	Eau (Kg)	Super plastifiant (Kg)	Sable (0/3) (Kg)	Gravier (3/8) (Kg)	Gravier (8/16) (Kg)
1BAP5	540	60	600	226.5	10.8	762	368	368
2BAP5	480	120	600	216.5	10.2	762	368	368
1BAP10	540	60	600	222.5	10.8	762	368	368
2BAP10	480	120	600	215	10.2	762	368	368
1BAP20	540	60	600	214	10.8	762	368	368
2BAP20	480	120	600	211	10.2	762	368	368

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

D'ou:

Liant=ciment +fillers calcaire.

N.B:

Comme a été montré dans plusieurs études [Youjun, 02] [Naadia, 04], il est possible d'élaborer des bétons autoplaçants sans l'utilisation d'un agent de viscosité, et afin de rester dans le contexte de la valorisation des matériaux locaux, il a été choisi de ne pas utiliser ce type d'adjuvant. [N.Rebbouh ,2006]

Les caractéristiques intrinsèques des six compositions sont rassemblées dans le tableau II-1-9.

Tableau II-1-9: Caractéristiques intrinsèques des BAP étudiés.

Caractéristiques	Béton					
	1BAP5	2BAP5	1BAP10	2BAP10	1BAP20	2BAP20
Rapport F/L	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2
Rapport E/L	0.377	0.361	0.371	0.358	0.356	0.352
Rapport E/C	0.419	0.451	0.412	0.448	0.396	0.44
Volume de pâte	432.77	426	428.77	424.5	420.27	420.5
Rapport G/S	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96

II-1-4-2 Exécution de l'essai:

Nous présenterons dans ce qui suit, les différentes étapes suivies et respectées pour la réalisation des essais sur les différentes compositions retenues.

a) Préparation de gâchée :

La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que celle d'un béton ordinaire.

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant nous suivons le mode opératoire suivant :

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules (cylindriques/prismatique) nécessaires pour les essais, ces derniers doivent être nettoyés et graissés à l'aide d'un lubrifiant (huile de décoffrage) afin d'éviter la cohésion du béton et faciliter le décoffrage.
- Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, sinon les sécher préalablement dans l'étuve,
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le superplastifiant est ajouté à la première moitié de l'eau de gâchage,
- Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment et filler calcaire).

b) Procédure de malaxage:

Le malaxeur utilisé est un malaxeur mobile à axe vertical dont la cuve est fixe et les palettes de malaxage sont animées d'un mouvement circulaire, il est équipé d'une trappe de vidange, à ouverture manuelle ajustable, pour récupération du mélange dans un bac ou une brouette.

Le malaxeur a une capacité de 120 litres, les palettes et la cuve sont réalisées en acier spécial résistant à l'usure et sont conçues pour assurer un malaxage rapide et particulièrement homogène.

Le temps de malaxage suivant la norme NFP18-404 est de :

"Un mélange à sec de gravier, filler, ciment et sable pendant 120 seconde, ensuite l'introduction de la solution de (l'eau + super plastifiant), le tout malaxé encore pour 120s."

L'ordre d'introduction des composants et les séquences de malaxage sont les suivants:

- Pré mouillage du malaxeur pour limiter une absorption supplémentaire de l'eau de gâchage par les parois du malaxeur,
- Introduire les éléments dans le malaxeur, en commençant par gravier (8/16), gravier (4/8), filler calcaire, ciment et sable. (gros éléments, liant, sable),
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 120 s.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié du l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant), puis ajouter la deuxième moitié d'eau graduellement, pendant 120 s.
- Effectuer les essais, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues,
- après arrêt du malaxage, remplir immédiatement les différents moules destinés aux corps d'épreuve correspondants aux essais programmés.
- Pour la composition des six mélanges, le même protocole a été utilisé.



Figure II-1-11: Le malaxeur utilisé.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

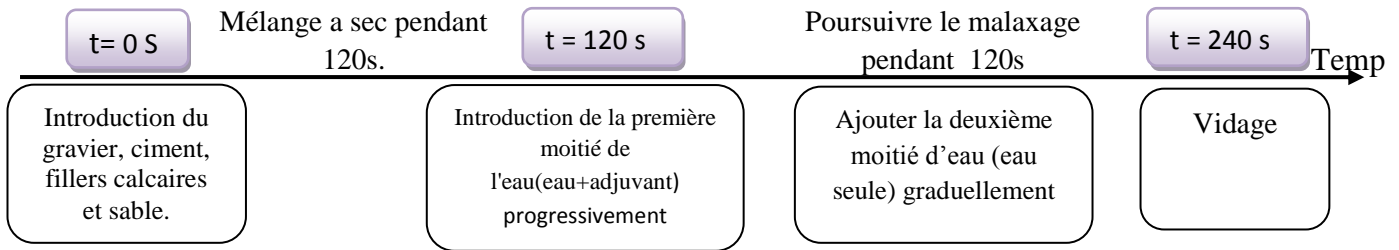


Figure II-1-12 : Les phases de malaxage.

c) Confection des éprouvettes:

- La confection des éprouvettes est réalisée sur une aire horizontale et ferme.
- Les éprouvettes sont coulées dans des moules démontables, réalisés par un matériau solide, non réactif au ciment et non absorbant. Les parois du moule doivent être suffisamment rigides pour éviter toutes déformations pendant la confection et le démoulage des éprouvettes, une fois assemblés, ils doivent être étanches pour éviter toute perte de laitance et répondre aux tolérances dimensionnelles.
- Les moules doivent être nettoyés et légèrement huilés.
- La mise en place du béton dans les moules est réalisée à l'aide d'une pelle à coque cylindrique en deux ou trois couches successives suivant les dimensions des moules, en absence de vibration car le BAP est capable de s'écouler sous son propre poids.
- La finition de la surface est effectuée à l'aide d'une règle.
- Les éprouvettes sont protégées contre l'évaporation par un papier film plastique.
- Des enregistrements doivent permettre de garantir l'identification de l'éprouvette depuis le prélèvement jusqu'à l'essai.
- Plusieurs formes de corps d'épreuve ont été coulées pour chacune des six compositions.

i)Epreuve de caractérisation :

- **Eprouvettes Cylindriques** : Conformément à la norme NF P18-406 (NA427) [NORM ,81b], les éprouvettes cylindriques d'élancement 2 et de dimensions (16x32) cm² sont utilisées pour l'essai d'écrasement par compression simple.



Figure II-1-13 : a)Moules cylindriques (16x32) cm² pour moulage des éprouvettes de béton,
b) Eprouvettes cylindriques (16x32) cm² destinées à l'essai de compression.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

- **Eprouvettes prismatiques** : Conformément à la norme NFP18-407(NA428) [NORM, 81d], des éprouvettes prismatiques de section carrée, d'élancement 4 et de dimensions (7x7x28) cm³ sont destinées pour les essais de traction par flexion.



Figure II-1-14 : a) Moules prismatiques (7x7x28) cm³ pour moulage des éprouvettes de béton,
 b) Eprouvettes prismatiques (7x7x28) cm³ destinées à l'essai de traction par flexion.

Le tableau II-1-10 définit le programme expérimental et le nombre d'essais effectués dans chaque cas s'explique d'abord par l'importance des sollicitations pour l'objectif envisagé.

Tableau II-1-10: Les éprouvettes utilisées pour performances mécaniques.

Béton	Compression			Traction par flexion		
	Type	Dimensions	Nombre	Type	Dimensions	Nombre
1BAP5	Cylindrique	16x32cm	12	Prismatique	7x7x28cm	6
2BAP5	Cylindrique	16x32cm	12	Prismatique	7x7x28cm	6
1BAP10	Cylindrique	16x32cm	12	Prismatique	7x7x28cm	6
2BAP10	Cylindrique	16x32cm	12	Prismatique	7x7x28cm	6
1BAP20	Cylindrique	16x32cm	12	Prismatique	7x7x28cm	6
2BAP20	Cylindrique	16x32cm	12	Prismatique	7x7x28cm	6

Les nombres indiqués correspondent aux essais les plus significatifs, les cas aberrants étant exclus.

ii) Epreuve de retrait:

Les essais de retrait sont réalisés sur des éprouvettes coulées dans des moules à trois alvéoles prismatiques (7x7x28) cm³ munies de plots en métal à leurs extrémités qui serviront à les installer sur l'appareil de mesure, neuf éprouvettes sont coulées à l'occasion de chaque gâchée qui aideront pour chaque mode d'essai de retrait.

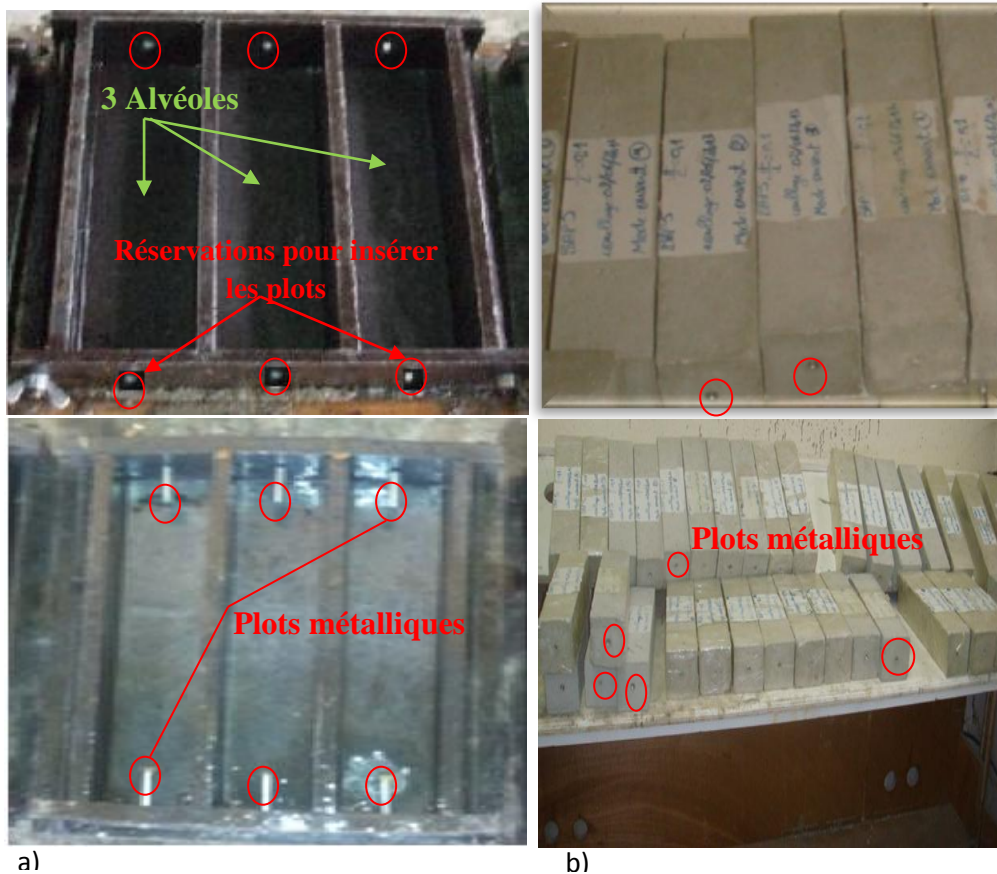


Figure II-1-15: a) Les moules prismatiques (7x7x28) cm³ munies de plots pour moulage des éprouvettes de béton,
b) Les éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm³ munies de plots destinées à la mesure de retrait,

iii) Epreuve de perte en masse:

La mesure de la perte en masse est effectuée sur les mêmes éprouvettes destinées aux essais de retrait.

d) Cure des éprouvettes prismatiques et cylindriques:

Les conditions de conservation des éprouvettes sont les suivantes (Critères fournis par la RILEM [RILEM, 95]):

- Après le gâchage, les moules cylindriques et prismatiques sont couverts par un papier film plastique pour empêcher la dessiccation et gardés dans une pièce à température ambiante (20±2) C° et de (50±5)% d'humidité relative.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

- Le démoulage est effectué à un jour ($24h \pm 4h$) et les éprouvettes sont ensuite conservées en cure correspondante jusqu'au démarrage des essais respectifs.



Figure II-1-16 : Cure d'éprouvettes prismatiques et cylindriques.

e) Conservation des éprouvettes :

i) Eprouvettes destinées à l'écrasement:

Elles sont conservées à une température de $(20 \pm 1) \text{ C}^\circ$ dans des emballages plastiques (sacs plastiques) de 100% d'humidité relative ceci permet d'éviter les pertes d'eau, et de garantir le déroulement normal du processus de l'hydratation ciment jusqu'à l'âge d'écrasement à 7 et 28 jours.



Figure II-1-17: Conservation des éprouvettes destinées à l'écrasement (compression et traction par flexion).

ii) Eprouvettes destinés aux mesures de retrait et de perte en masse:

3 types de conservations sont étudiés:

- ✚ Conservation à l'air libre : ($T^\circ = 20 \pm 1^\circ\text{C}$) et (HR de $50 \pm 5\%$),

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

- ✚ Conservation couverte : ($T^{\circ} = 20 \pm 1^{\circ}\text{C}$) et (HR de $80 \pm 5\%$),
- ✚ Conservation dans l'eau : ($T^{\circ} = 20 \pm 1^{\circ}\text{C}$) et (HR de $95 \pm 5\%$).

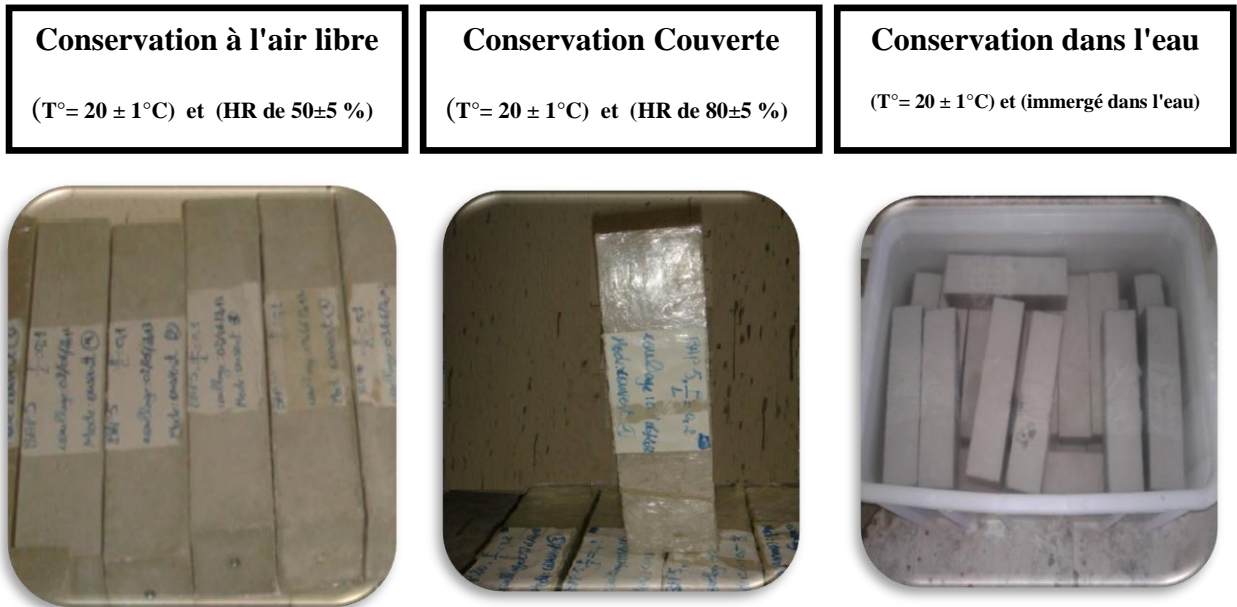


Figure II-1-18 : conditions de conservation des éprouvettes de mesure des variations pondérales et dimensionnelles.

II-1-4-3 Les essais de caractérisation:

Les essais effectués sur les bétons autoplaçants permettent de caractériser leurs performances physiques, mécaniques et de conclure sur leurs natures (autoplaçant ou non). Pour chaque essai, nous analysons l'influence de quelques paramètres tel que : le rapport F/L (0,1 et 0,2) et la finesse de filler calcaire (UF5, UF10 et F20).

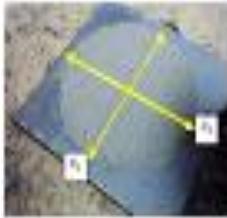
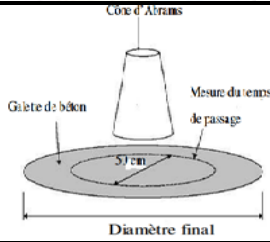



a) Etat frais:

De nombreuses mesures ont été effectuées pour la caractérisation de BAP à l'état frais :

- L'étalement au cône d'Abrams,
- La boîte en L,
- Le temps d'écoulement au V-funnel,
- L'air occlus, résistance à la ségrégation et densité). (Voir annexe A)

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

Tableau II-1-11: Spécifiés des BAP les plus courants à l'état frais.

Essais	Grandeurs spécifiques	Norme	Valeurs recommandées	Photos
Etalement	SF (mm)	NF EN 12350-8	$650 \leq SF \leq 750$	
Etalement	$T_{500}(S)$	NF EN 12350-8	$2 \leq T_{500} \leq 5$	
V-funnel	$T_v(S)$	NF EN 12350-9	$8 \leq T_v \leq 12$	
Boite en L	H_2/H_1 (%)	NF EN 12350-10	$H_2/H_1 \geq 80$	
Stabilité au tamis	Π (%)	NF EN 12350-11	$2 \leq \pi \leq 15$	

b) Etat durci:

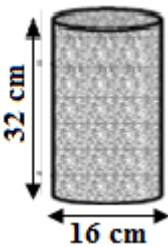
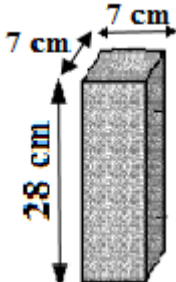
Les essais mécaniques normalisés ont été réalisés aux échéances prévues (7 et 28 jours), de façon à obtenir l'évolution progressive des caractéristiques mécaniques.

Nous étudions les propriétés mécaniques suivantes :

- Résistance à la compression,
- Résistance à la traction par flexion).

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

Tableau II-1-12 : Essais de caractérisation mécanique.

Essai	Spécimen	Mesure	Échéance	Norme ou protocole
Résistance en compression	<p>Cylindre diamètre : 16 cm hauteur : 32 cm section : 200 cm²</p> 	f_c (MPa)	7 et 28 jours	(NF P18-406)
Résistance en traction	<p>Prisme Base: 7x7 cm hauteur : 28 cm section: 28 cm²</p> 	f_t (MPa)	7 et 28 jours	(NF P18-407)

i) Résistance mécanique à la compression:

Cet essai consiste à soumettre une éprouvette cylindrique (16x32) cm² du béton à l'écrasement par compression axiale, avec une machine de type «CONTROLS», (Figure II-1-) ayant une capacité maximale de 3000 KN.

La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette avec une vitesse de chargement constante et égale à 0,5 MPa/s \pm 0,2 MPa/s. (Voir annexe B)

ii) Résistance mécanique à la traction par flexion:

Cet essai permet de déterminer la résistance en flexion du béton, il est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm³.

L'éprouvette prismatique est soumise à un moment de flexion à l'aide d'une machine de type «CONTROLS» (figure II-1-), munie d'un dispositif de chargement équipé de deux rouleaux d'appui et un rouleau supérieur reposant sur un support articulé pour la transmission de la charge. (Voir Annexe B)

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE



Figure II-1-19 : Machine de l'essai de compression.



Figure II-1-20: Machine et dispositif de l'essai de traction par flexion.



Figure II-1-21 : Ecrasement des éprouvettes : Cylindre (Compression), Prisme (Traction par flexion).

II-1-4-4 Mesure de retrait:

Le retrait est une donnée importante à connaître pour n'importe quel béton. L'essai de retrait permet d'évaluer le potentiel de contraction d'un béton pendant les premiers mois suivant sa fabrication, une campagne expérimentale sur le retrait total, endogène et gonflement a été réalisée au Laboratoire de Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC).

a) Objectif de l'essai:

Il s'agit d'évaluer le retrait, ou le gonflement sur des éprouvettes prismatique (7x7x28) cm³.

b) Protocole expérimental :

Les protocoles expérimentaux pour les essais de retrait et gonflement suivent les recommandations de la RILEM -TC 107-CSP « Standardise Tests Methods for Creep and Shrinkage » [RILEM, 98].

Les mesures de retrait et de gonflement sont lancées sur des prismes âgés au moins un jour, au départ elles sont réalisées à des termes très courts, la fréquence de mesure augmentant après avec le temps. Les déformations de retrait (gonflement) ont été suivies sur une période de 90 jours.

c) Principe de l'essai:

Il s'agit d'estimer la déformation longitudinale de l'éprouvette au cours du temps. Nous comparons, à différents temps "t", la variation de longueur d'une éprouvette (7x7x28) cm³ par rapport à sa longueur à un temps t₀ pris pour origine.

Les mesures sont faites dans l'axe des éprouvettes, entre deux plots métalliques noyés dans le béton au coulage.

d) Equipement nécessaire:

- Une salle maintenue à une température de (20 ± 2) °C et à une humidité relative supérieure ou égale à (50 ± 5) %.
- Des moules prismatiques (7x7x28), équipés de plots de retrait en métal (Figure II-1-15).
- Un rétractomètre (tel que celui présenté sur la figure II-1-23) équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une exactitude inférieure ou égale à 0,005 mm.
- Une tige de 280 mm de longueur permet de régler le zéro du rétractomètre (sert de référence de mesure). Cette tige est en Invar de façon à ce que les variations de température qu'elle peut connaître au cours de la manipulation n'entraînent pas de modification appréciable de sa longueur.

L'appareil de mesure de retrait utilisé dans nos essais est un rétractomètre digital, (Figure II-1-23) il est muni d'un comparateur (Figure II-1-22) mesurant les déformations suivant l'axe longitudinal des éprouvettes entre deux plots métalliques noyer dans le prisme de béton, les contacts entre les plots insérés dans les prismes de béton et le support sont réalisés à l'aide de billes (Figure II-1-25).

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

L'étalonnage du rétractomètre est effectué par une tige de contrôle métallique en invar, qui sert de base de mesure (référence), l'incertitude des mesures évaluée à $\pm 5 \mu\text{m/m}$, la valeur retenue du retrait représente la moyenne arithmétique de trois mesures sur les 3 éprouvettes issues du même moule.



Figure II-1-22 : Comparateur avec une exactitude $\geq 0,005 \text{ mm}$

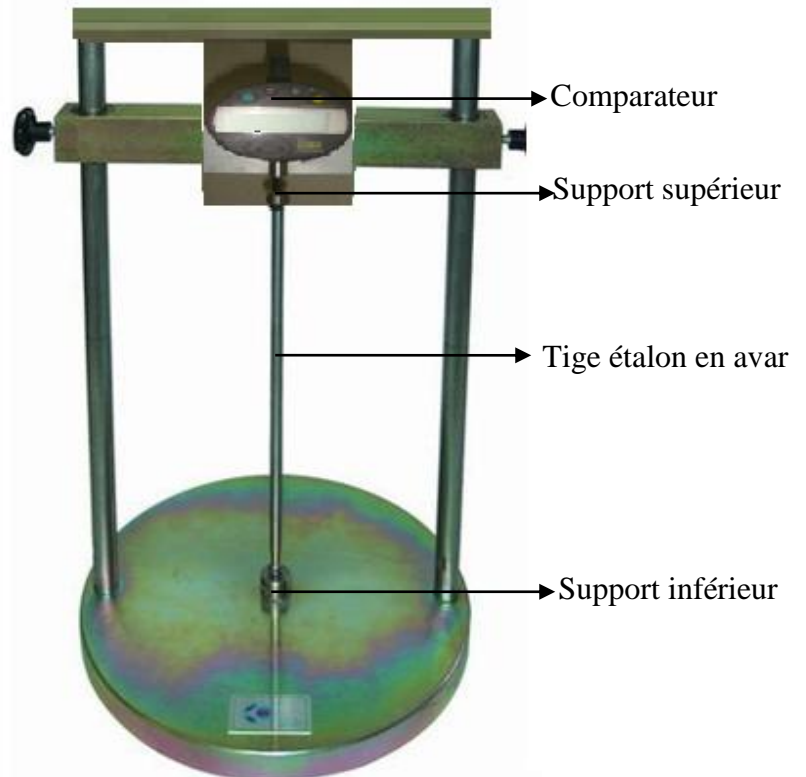


Figure II-1-23: l'appareil de mesure de retrait

e) Conduite de l'essai:

Des essais de retrait libre conformément à la norme **NF P 15-433** ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$.

Les éprouvettes ont été coulées dans des moules à trois alvéoles prismatiques $(7 \times 7 \times 28 \text{ cm})$ munies de plots métalliques qui sont vissés au moule au moment de la mise en place du béton (Figure II-1-16) puis désolidarisé du moule avant le démoulage. Après durcissement, les éprouvettes sont donc munies à leurs deux extrémités de plots qui serviront à les positionner sur rétractomètre comme indiqué sur la Figure II-1-25.

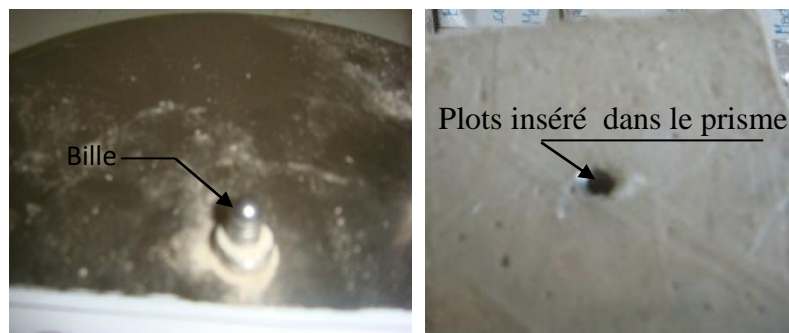


Figure II-1-24: Bille assure le contact entre le support du rétractomètre et plot métallique inséré dans le prisme du béton.



Figure II-1-25: éprouvettes prismatiques munies de plots.

Après démoulage, une mesure initiale de longueur est effectuée et sert ensuite de référence.

Soit $l(t_0)$ la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage (24 h après la confection des éprouvettes).

La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0) \dots\dots (58)$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L} \dots\dots\dots (59)$$

f) Procédure expérimentale:

Pour chaque composition de béton, neuf éprouvettes sont utilisées pour l'essai de retrait:

- Trois prismes sont scellés instantanément après leur démoulage à l'aide d'un papier film plastique adhésif. Ce papier empêche les échanges d'humidité entre le béton et l'air ambiant. Le retrait mesuré sur ces éprouvettes est endogène. La moyenne des mesures prises à chaque instant sur ces trois éprouvettes donne la courbe d'évolution du retrait endogène.
- Trois prismes sont laissés en contact avec l'air ambiant. Le retrait mesuré sur ces prismes est total, soit la combinaison du retrait endogène et du retrait de séchage. Dans ce cas aussi, la moyenne est faite sur les mesures prises sur les trois éprouvettes afin d'obtenir l'évolution du retrait total.
- Trois prismes sont mis immédiatement après leur démoulage dans un bac d'eau, de façon à ce qu'ils puissent être recouverts. La déformation mesurée sur ces

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

échantillons est le gonflement, la moyenne des mesures prises à chaque instant sur ces trois échantillons donne la courbe d'évolution du gonflement.

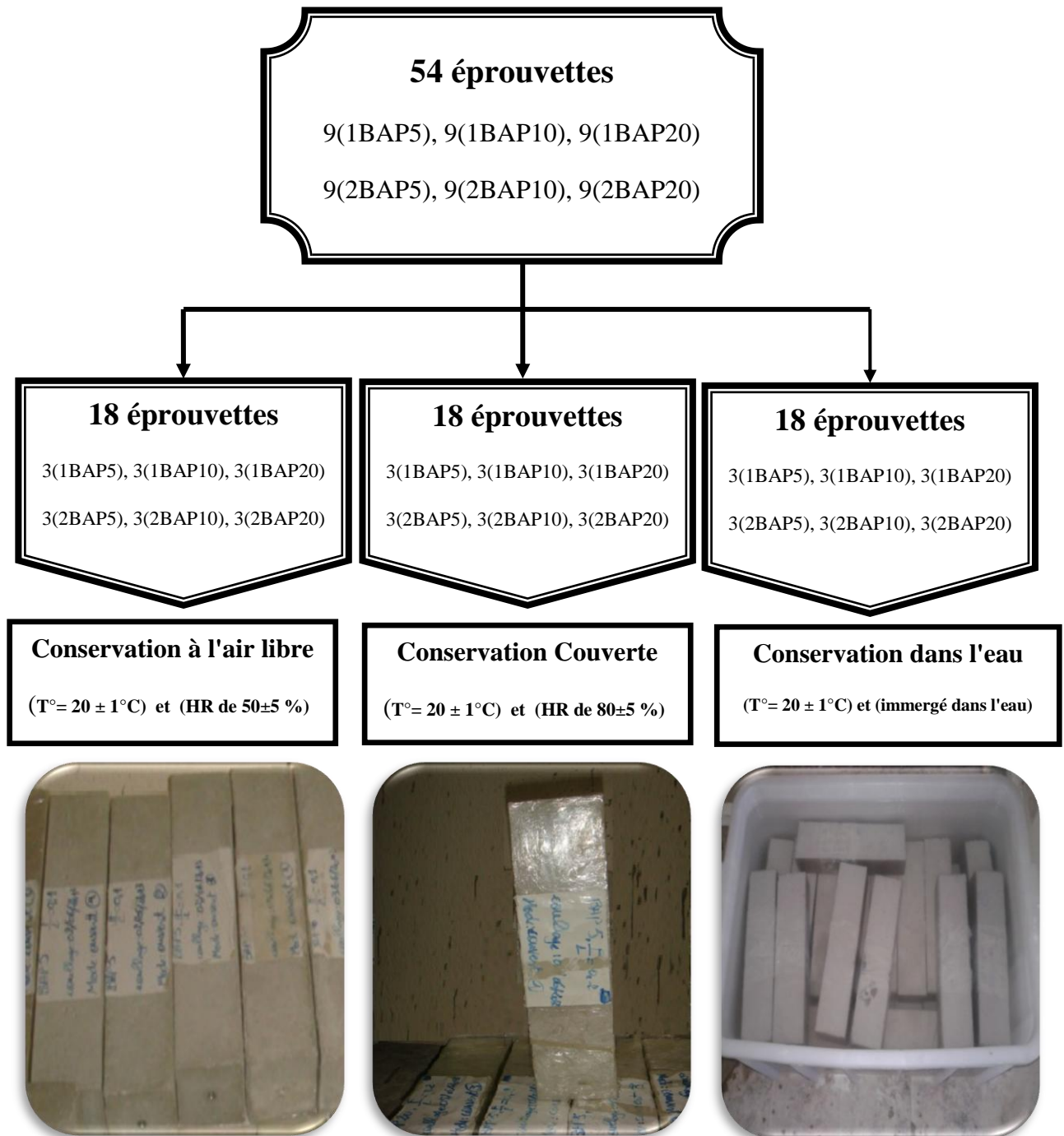


Figure II-1-26 : présentation des conditions de conservation de différentes échantillons pour la mesure des variations pondérales et dimensionnelles.

N.B :

- Les essais sont lancés sur des prismes âgés au moins d'un jour.
- Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air, $\Delta l(t)$ est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette.
- Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, $\Delta l(t)$ peut être positif: il y a alors gonflement.
- L'effet de la cure couverte et immergé n'intervient qu'à partir de l'échéance de 2 jours
- Au moins 3 rotations complètes de l'éprouvette autour de l'axe de mesure du rétractomètre, dans les 2 sens de rotation possibles, sont effectuées jusqu'à l'obtention d'une valeur « stable » sur le comparateur. Cela a pour effet de maximiser la répétabilité de la mesure.
- Chaque éprouvette ne doit pas être sortie de son ambiance que le moins de temps possible, maximum 30 mn.
- Les mesures sont exécutées à des termes très courts au début, la fréquence de mesure augmente après avec le temps.
- Nous estimons les incertitudes de l'appareil employé pour nos mesures à $\pm 10 \mu\text{m/m}$. Cette incertitude doit être prise en compte mais paraît faible en vue des intervalles couramment examinés sur les mesures réalisées sur nos trois prismes.

g) Méthodologie d'essai :

Les mesures de retrait endogène et de retrait total et de gonflement sont prises pour une durée de 90 jours. Les fréquences de mesures sont adaptées à la cinétique du retrait, les premières mesures sont rapprochées et deviennent plus espacées avec le temps.

Les éprouvettes sont arrangées de façon à ce que chacune d'elles soient éloignées des voisines d'au moins 1 cm, et qu'elle soit entourée d'air sur toutes ses cotes. Les mesures sont faites dans l'axe des éprouvettes, entre deux plots métalliques noyés dans le béton au coulage (ou collés sur les faces rectifiées des éprouvettes). Les plots doivent être nettoyés avant chaque mesure.

Le comparateur a été auparavant calibré, cette démarche permettant d'atteindre à des valeurs corrigées par rapport à celles postées par le comparateur. Les incertitudes sont donc spécialement attachées à l'opérateur et aux modalités d'emplois

Celles-ci étaient strictement identiques d'une formulation à l'autre. Nous estimons les incertitudes de l'appareil employé pour nos mesures à $\pm 10 \mu\text{m/m}$. Cette incertitude doit être prise en compte mais paraît faible en vue des intervalles couramment examinés sur les mesures réalisées sur nos trois prismes. Ces mesures au rétractomètre sont

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

associées à des mesures de pesées sur une balance (précision de ± 0.1 g) pour conduire l'évolution de la masse des éprouvettes au cours du temps,

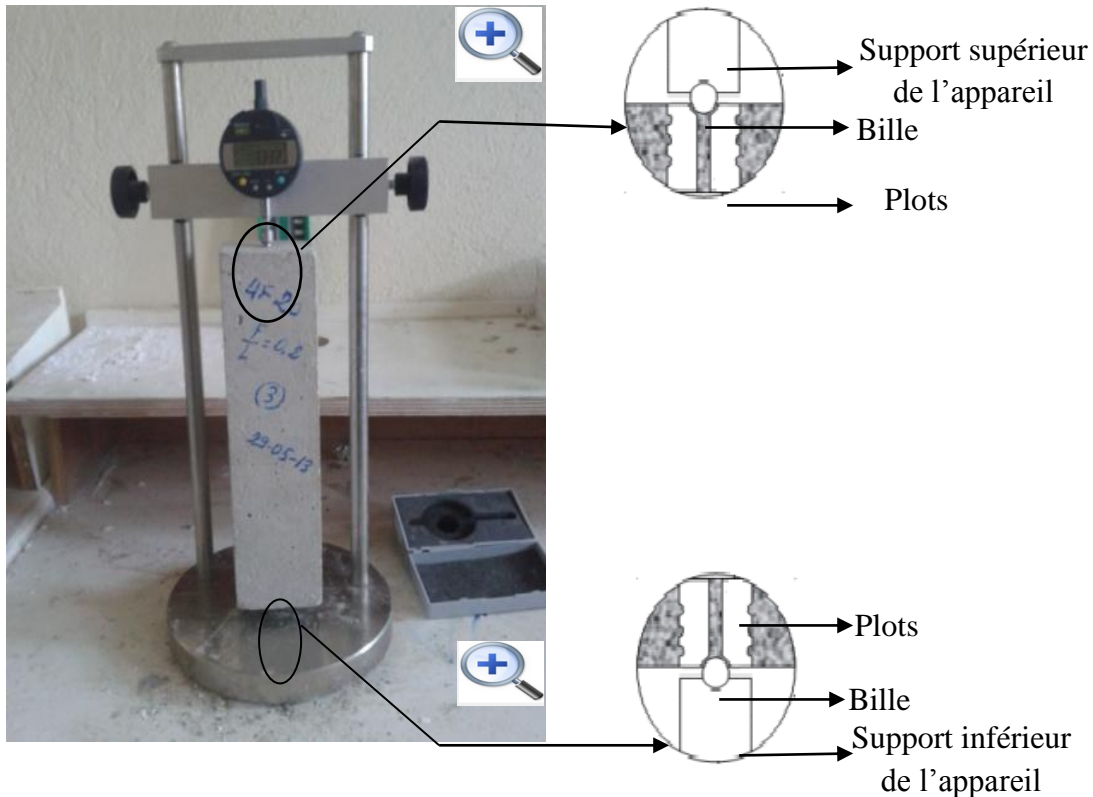


Figure II-1-27: Positionnement l'éprouvette sur l'appareil de retrait « rétractomètre ».

II-1-4-5 Mesure de la perte en poids:

Parallèlement aux essais de retrait, une mesure annexe est nécessaire afin de mieux appréhender le comportement du béton. Pour cela, des éprouvettes linéiques sont réalisées afin de pouvoir mesurer la perte en masse.

Après démoulage, trois éprouvettes linéiques (7x7x28) cm³ sont régulièrement pesées à l'aide d'une balance de précision au centième de gramme et d'une portée de (12 kg), le zéro de la balance est vérifié après et avant chaque mesure.

Ceci nous permet de calculer la perte de masse moyenne due à la dessiccation à partir de ces trois mesures. Le calcul est effectué en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'éprouvette (cf.équation).

$$\Delta m = 100 \times \frac{(m_{in} - m(t))}{m_{in}} \dots\dots\dots(60)$$

Avec :

- Δm :Le pourcentage de perte en masse en pourcentage (%),
- m_{in} : La masse initiale de l'éprouvette avant dessiccation en gramme [g],
- $m(t)$:La masse mesurée à l'instant (t) en gramme [g].

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
CHAPITRE II-1 : MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

Les éprouvettes sont étudiées selon 3 modes de conservation (voir Figure II-1-27)

Touts les prismes (même prismes destinés à la mesure de retrait) ont été pesés fréquemment après chaque mesure de retrait (gonflement), afin d'examiner la dépendance entre la variation de masse et le retrait (gonflement) de chaque composition.



Figure II-1-28 : Balance numérique.

CHAPITRE II-2 : RESULTATS EXPERIMENTAUX

II-2-1 Introduction :

Après avoir exposé, dans le chapitre précédent, le cadre détaillé de l'étude expérimentale pour la mesure des variations dimensionnelle (retrait et gonflement) et pondérale (perte et gain en masse) ,le présent chapitre synthétise les résultats de l'étude de retrait total, retrait endogène, et gonflement, un troisième retrait peut être calculé par différence en estimant qu'il y ait autonomie des phénomènes : le retrait de dessiccation, à partir des retraits (total et endogène) mesurés sur les spécimens. Ce retrait peut être examiné comme dû seulement à la vaporisation de l'eau comportée dans la pâte de ciment hydraté et qui se développe à partir des faces exposées à l'environnement.

Pour une meilleure approche, l'étude a été comparative, les critères de comparaison choisis étant : le dosage en filler calcaire exprimé par le rapport « Fillers/Liant » et la finesse de filler calcaires.

L'analyse des résultats est présentée en deux parties. Dans la première partie, les résultats de caractérisation à l'état frais (essai d'étalement, essai de la boîte en L, essai de V-funnel, essai de stabilité au tamis et la teneur de l'air occlus) et durci (la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion), la deuxième partie est une étude phénoménologique consacrée à l'analyse des résultats expérimentaux de variations dimensionnelles et pondérales. Le résultat d'un essai est la moyenne d'au moins trois valeurs sur trois échantillons (ou gâchées) issues d'un même prélèvement (**NF P 18 305**)

II-2-2 Essai de caractérisation :

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante, l'introduction des fillers calcaires dans la composition d'un BAP engendre des modifications significatives sur les propriétés à l'état frais et durcis. A l'état frais les fillers calcaires modifient la structure du squelette granulaire en améliorant la capacité d'empilement des particules fines c'est l'effet granulaire. A l'état durci ils présentent un caractère liant supplémentaire.

La norme béton NF EN 206-1 précise que "tous les bétons doivent être soumis à un contrôle de production sous la responsabilité du producteur". Ces contrôles ont pour but de vérifier la conformité par rapport aux spécifications en vigueur et/ou à un cahier des charges demandé. Parmi tous les contrôles nécessaires, il faut distinguer ceux qui sont effectués lorsque le béton est à l'état frais et ceux qui le sont lorsqu'il est à l'état durci.

II-2-2-1 Etude de béton frais :

Les contrôles réalisés sur le béton à l'état frais constituent les premières vérifications possibles de la conformité d'un béton et permettent de détecter d'éventuelles variations susceptibles de nuire à la mise en œuvre.

Trois essais de caractérisation ont été préconisés en l'an 2000 par l'Association Française de Génie Civil [AFGC]. D'abord provisoires, ces recommandations sont devenues sur site les essais de référence pour valider une formule de BAP.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

a) **Essai d'étalement:** Pour caractériser le caractère autoplaçant, l'essai d'étalement a été pratiqué, deux paramètres sont mesurés lors de l'essai :

- Le temps mis par le matériau pour développer une galette de 500 mm de diamètre (T_{500}).
- Le diamètre final (D_{moyen}) atteint par la galette d'étalement.

Il faut rappeler qu'est considéré comme autoplaçant un béton qui forme une galette de diamètre supérieur à 65 centimètres.

Les réponses de l'essai d'étalement sur les bétons confectionnés sont présentées dans le tableau III-2-1.

Tableau II-2-1: Résultat d'essai d'étalement des BAP formulés.

Essai d'étalement						
Notations	1BAP5	1BAP10	1BAP20	2BAP5	2BAP10	2BAP20
Etalement (D_{moyen})	70.00 cm	68.50 cm	69.50 cm	69.00 cm	67.00 cm	69.00 cm
Etalement (T_{500})	2.11s	2.90 s	2.34 s	2.57 s	3.18 s	2.61 s

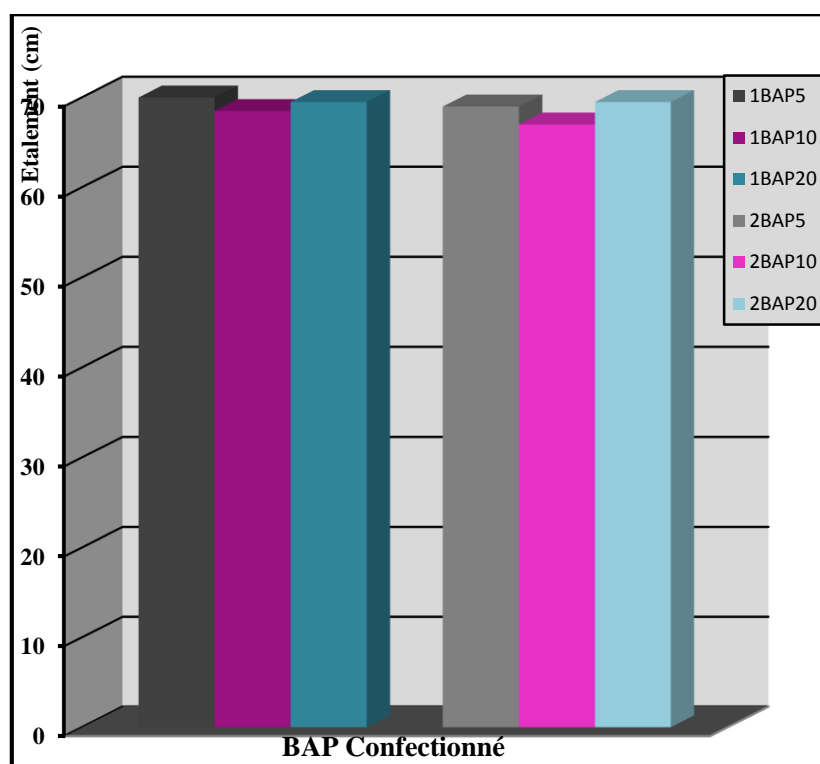


Figure II-2-1 : Evolution de l'étalement des six BAP.

Nous pouvons constater que l'ensemble des bétons autoplaçants (1BAP5, 2BAP5, 1BAP10, 2BAP10, 1BAP20, 2BAP20) présentent des étalements supérieurs à 65 cm et respectent le critère d'étalement.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Un temps d'étalement T_{500} (le temps mesuré en secondes pour atteindre une galette de 50 cm de diamètre) proche des valeurs couramment rencontrées (3 secondes).

La diminution de l'étalement entre le 1BAP5 et 2BAP5 (70cm - 69cm), entre le 1BAP10 et 2BAP10 (68.5cm - 67cm) et entre le 1BAP20 et 2BAP20 (69.5cm - 69cm) est due probablement à la diminution du dosage du ciment de 540 Kg/m^3 à 480 Kg/m^3 ,

Des observations complémentaires peuvent aider à appréhender certaines propriétés à l'état frais des bétons autoplaçants :

Nous pouvons évaluer visiblement les risques de ségrégation du béton par l'essai au cône d'Abrams, aucune couronne de laitance ou de mortier n'a été remarquée en périphérie du béton après étalement. De plus, les gros granulats sont entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas amoncelés au milieu des galettes



de béton.

Figure II-2-2: Etalement satisfait d'un béton autoplaçant (BAP homogène).

b) La boîte en L: permet de simuler l'écoulement du béton dans un coffrage ferrailé et de vérifier l'apparition ou non de blocage du béton au niveau des barres d'armature. Le taux de remplissage final nous renseigne sur la mobilité du béton.

Tableau II-2-2 : Résultat d'essai de la boîte en L des BAP formulés.

Essai de la boîte en L						
Notations	1BAP5	1BAP10	1BAP20	2BAP5	2BAP10	2BAP20
H_2/H_1	0.89	0.80	0.85	0.83	0.77	0.85

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX



Figure II-2-3: Passage du BAP à travers les armatures sans blocage.

c) Stabilité au tamis: Cet essai vise à qualifier les BAP vis-à-vis du risque de ségrégation.

Tableau II-2-3: Pourcentage de laitance obtenue lors de l'essai de stabilité au tamis.

Essai de stabilité au tamis						
Notations	1BAP5	1BAP10	1BAP20	2BAP5	2BAP10	2BAP20
II (%)	13.68	9.76	12.87	11.24	8.86	10.47

Nous voyons que le pourcentage en poids de laitance dans le récipient est acceptable dans cet essai ($2\% \leq \text{II}_{\text{laitance}} \leq 15\%$).

d) V-funnel : L'essai consiste à observer et à mesurer l'aptitude à l'écoulement du béton au travers d'un orifice étroit.

Tableau II-2-4: Temps d'écoulement du béton frais par l'essai de V-funnel

Essai de V-funnel						
Notations	1BAP5	1BAP10	1BAP20	2BAP5	2BAP10	2BAP20
Temps « T_v »(S)	11	8,6	8	9,06	9,45	10,03

Nous voyons que le temps d'écoulement des BAP est acceptable $8 \leq T_v \leq 14$.

e) L'air occlus : La teneur en air des bétons a été déterminée à l'aide d'un aéromètre, L'air occlus correspond au volume d'air entraîné au sein du matériau lors des opérations de malaxage et qui reste piégé dans le béton après mise en œuvre.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Tableau II-2-5: Pourcentage d'air occlus.

Air occlus						
Notations	1BAP5	1BAP10	1BAP20	2BAP5	2BAP10	2BAP20
Air occlus (%)	1.9	2.8	1.97	2.4	3.1	2.1

D'après les réponses des tests de caractérisation à l'état frais réalisés sur les bétons confectionnés, on a tiré les remarques suivantes :

- Les trois conditions de l'association Française de génie civil [AFGC] à l'état frais de tous les bétons étudiés sont respectées : des étalements supérieurs à 65 cm, des rapports à la boîte en L supérieurs à 0.8, des stabilités satisfaisantes ($2\% \leq \Pi_{\text{laitance}} \leq 15\%$), donc le béton testé est un béton autoplaçant.
- Les six BAP présentent pratiquement le même étalement ($67 \pm 3\text{cm}$) il est clair que l'influence des paramètres de composition est quasiment insignifiante.

II-2-2-2 Etude de performance mécanique du béton durci:

L'introduction des fillers calcaires dans la composition d'un BAP engendre des modifications significatives sur les propriétés à l'état durcis, elle permet une augmentation considérable de sa résistance à la compression et à la traction par flexion. Différents auteurs (NEH et al), (GHE et al), (ESP et al) (ZHU et al) ont montré que les fillers calcaires mènent de manière significative à une augmentation de la résistance à la compression particulièrement au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours. Ceci est expliqué par une hydratation favorisée car le calcaire n'est pas strictement inerte du point de vue chimique en présence d'un liant hydraulique puisqu'il conduit à la formation d'hydrates avec les aluminates et les silicates du ciment. Un accroissement significatif des résistances est relevé entre 7 et 28 jours. Le surcroît de résistance peut être attribué au taux de substitution (Attiogbe), (Neville) cité à [A.boudchicha, 2011]

D'autre part, LAWRENCE et al ont conclu en étudiant l'effet des additions minérales inertes sur l'hydratation des mortiers, que l'hydratation à courts termes des mortiers des additions chimiquement inertes était toujours plus important que celui des mortiers sans additions, et ont ainsi confirmé l'amélioration de l'hydratation du ciment avec des additions minérales inertes. Pour les fillers calcaires, il semble que la présence du carbonate de calcium (CaCO_3) favoriserait l'hydratation du C_3A dès les premiers instants (S.Jiang et H. Van Damme) cité à [A.boudchicha, 2011]

Nous présenterons les différentes influences des paramètres de composition notamment la finesse de filler calcaire et le rapport (Filler/Filler+Ciment), ainsi l'âge d'écrasement sur la résistance à la compression et à la traction par flexion.

Nous pouvons voir que les résistances des bétons en fonction du temps sont quasiment croissantes, et la résistance à la traction est en moyenne d'environ 6 fois plus faible que la résistance à la compression.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Quand nous comparons les résultats entre les BAP avec un rapport F/L=0,1 (1BAP5, 1BAP10, 1BAP20) et les BAP avec un rapport F/L=0,2 (2BAP5, 2BAP10, 2BAP20) on note que les résistances mécaniques finales (compression et traction par flexion) sont plus élevées pour les BAP avec un F/L=0,1, ce qui s'explique par un dosage en ciment plus important.

a) Résistance à la compression:

C'est l'essai le plus couramment utilisé pour caractériser la qualité d'un béton. Il consiste à soumettre une éprouvette du béton (16x32) cm² à l'écrasement par compression axiale, la mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La machine utilisée est de type « CONTROLS ».

Tableau II-2-6: Résistances à la compression à 7 et 28 Jours.

Notations	Résistance à la compression (MPa)	
	7 Jours	28 Jours
1BAP5	32,62	43,05
1BAP10	29,84	41,24
1BAP20	25,53	38,30
2BAP5	30,27	40,60
2BAP10	26,90	39,20
2BAP20	22,84	34,88

i) Influence de l'âge:

La figure ci-dessous présente les mesures des résistances à la compression sur des éprouvettes cylindriques (16x32 cm²), des six bétons à 7 et 28 jours d'âge.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

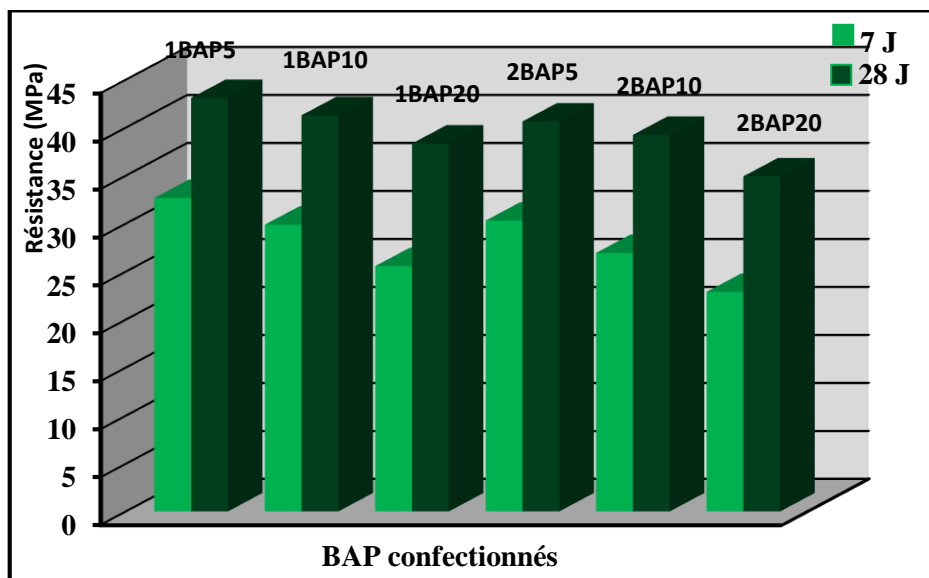


Figure II-2-4 : Evolution de la résistance à la compression des différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours

En analysant les courbes de cette figure, on peut voir que :

- Les résistances de tous les bétons augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute,
- Le béton 1BAP5 avec un rapport F/L= 0,1 et un filler UF5 est nettement plus résistant que tous les autres bétons pour toutes les échéances,
- Les six bétons étudiés atteignent plus de 68% de la résistance à la compression à l'âge de 7 jours. [(75.91% pour 1BAP5), (72.35% pour 1BAP10), (66.65% pour 1BAP20), (74.55% pour 2BAP5), (68.62% pour 2BAP10), (65.48% pour 2BAP20)].
- La cinétique de durcissement au jeune âge peut être évaluée par le rapport entre la résistance à 7 jours et la résistance à 28 jours (R_{c7}/R_{c28}), une petite différence apparaît entre les six bétons testés, la cinétique diminue avec l'augmentation du rapport F/L et diminue aussi avec la diminution de la finesse de filler calcaire. Nous avons obtenu une cinétique de (0.75 ,0.72 ,0.66 ,0.74 ,0.68 ,0.65) pour les bétons (1BAP5, 1BAP10, 1BAP20, 2BAP5, 2BAP10, 2BAP20) respectivement.

ii) Influence du rapport (Fillers/Liant) :

Sur l'histogramme de la figure (II-2-5), nous présentons l'influence du rapport (F/L) sur la résistance à la compression des différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours,

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

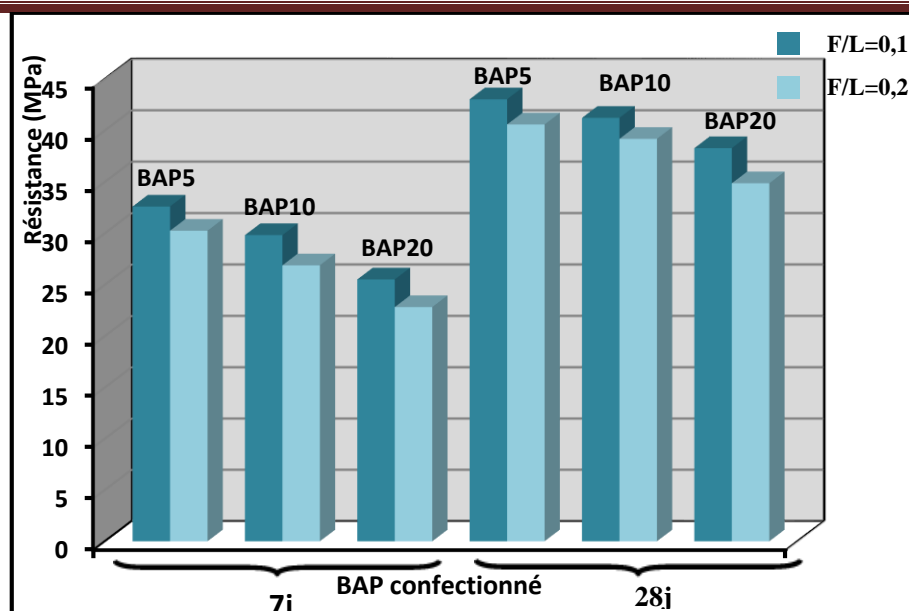


Figure II-2-5: Influence du rapport (F/L) sur la résistance à la compression des différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours.

On constate:

- Les bétons avec un rapport (F/L=0.1) présente des résistances plus élevées par rapport aux bétons avec (F/L=0.2) et cela est dû au dosage du ciment.
- Quel que soit le filler calcaire utilisé (UF5, UF10 ou UF20), l'augmentation du taux de substitution du ciment par du fillers calcaire de 10% à 20%, fait chuter la résistance à la compression de: 7,2% pour BAP5 (béton confectionné avec UF5), de 9,85% pour BAP10 (béton confectionné avec UF10), de 10,53% pour BAP20 (béton confectionné avec UF20) à 7 jours et de 5,69% pour BAP5, de 4,94% pour BAP10, de 8,92% pour BAP20 à 28 jours. On peut remarquer que l'introduction de 10% et 20% de fillers calcaire n'affecte pas beaucoup la résistance à la compression des BAP, et cela est vrai quel que soit l'âge du béton.
- La présence d'une quantité importante de filler calcaire comme addition dans les BAP a une action positive sur leurs compacités et par conséquent sur leurs résistances mécaniques.

iii) Influence de la finesse du filler:

La finesse du filler calcaire a un effet important sur l'évolution de la résistance en compression. En effet le filler le plus fin à posséder des petits pores et rend les BAP plus dense, donc une résistance plus élevée. Donc Plus la finesse de filler est grande, plus ces résistances mécaniques sont grandes.

A 7 et 28 jours, les bétons confectionnés à base de filler calcaire UF5 ont donnés des résistances à la compression plus élevées par rapport aux autres fillers calcaires (UF10 et UF20).

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

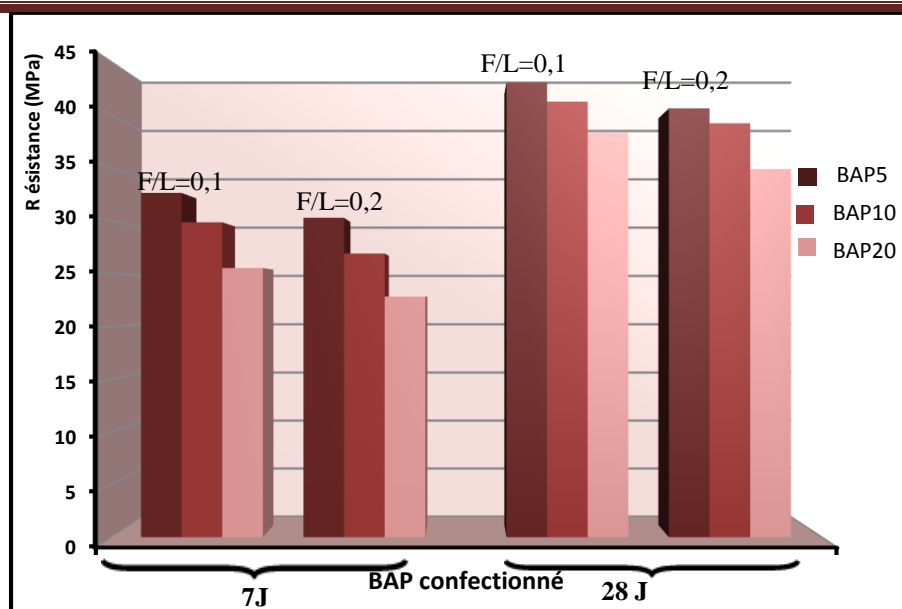


Figure II-2-6: Influence de la finesse de filler calcaire sur la résistance à la compression des différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours.

b) Résistance à la traction par flexion :

L'essai de traction par flexion est effectué sur des prismes de sections carrées (7x7x28) cm³ par la même machine de compression, pourvu d'un dispositif de flexion par trois points. Le prisme est placé dans la machine et il est soumis à une charge croissante jusqu'à sa rupture.

Tableau II-2-7: Résistances à la traction par flexion à 7 et 28 Jours.

Notations	Résistance à la traction par flexion (MPa)		
	7 Jours	28 Jours	28/7
1BAP5	4,50	6,83	34.11%
1BAP10	3,52	5,64	37.58%
1BAP20	2,75	4,85	43.29%
2BAP5	3,67	5,68	35.38%
2BAP10	2,93	4,99	41.28%
2BAP20	2,20	3,96	44.44%

i) Influence de l'âge:

La figure II-2-7 indique une évolution progressive de la résistance de traction par flexion au cours du temps des six bétons confectionnés.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

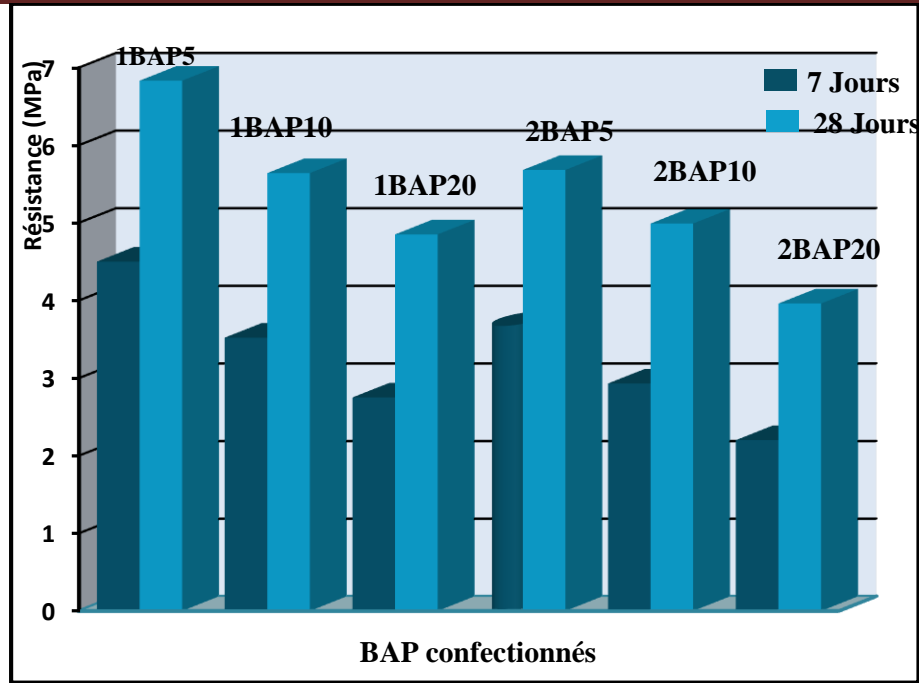


Figure II-2-7 : Evolution de la résistance à la traction des différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours.

Nous pouvons tirer les remarques suivantes :

- La résistance à la traction par flexion augmente avec l'âge des éprouvettes.
- Le béton qui a donné les meilleures performances est le 1BAP5 (BAP avec F/L= 0.1 et UF5).
- Les résultats obtenus montrent qu'à une échéance de 7 jours, on remarque des gains de résistance (par rapport à la résistance à 28 jours) peuvent atteindre : 34,11% pour 1BAP5, 37,58% pour 1BAP10, 43,29% pour 1BAP20, 35,38% pour 2BAP5, 41,28% pour 2BAP10 et 44,44% pour 2BAP20. Ces résultats sont prouvés par (Ghrici et al ,2005).
- R_{t7j}/R_{t28j} est de l'ordre de 60% ce qui montre que plus de 50% de la résistance est acquise dans les 7 premiers jours.

ii) Influence du rapport (Fillers/Liant) :

Sur la figure II-2-8, on peut voir l'influence du rapport (F/L) sur la résistance à la traction par flexion des bétons.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

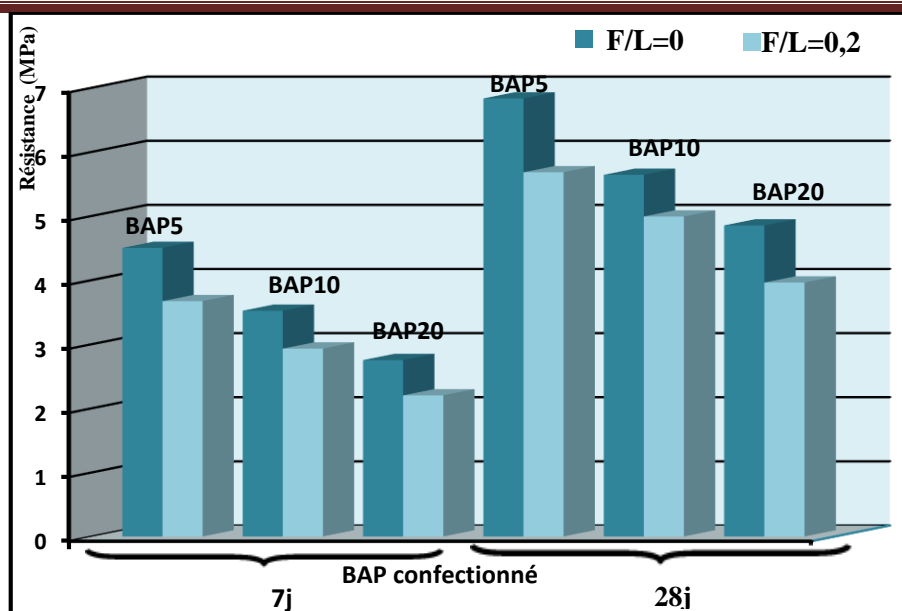


Figure II-2-8: Influence du rapport F/L sur la résistance à la traction des différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours.

Nous pouvons titrer les remarques suivantes :

- La résistance à la traction par flexion diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage d'ajout à 7j et à 28 jours. A titre d'exemple, une augmentation de la quantité de filler calcaire substituée de ciment de 10% à 20% diminue la résistance à la traction par flexion de 18,44% (BAP5 à 7J), 16,76% (BAP10 à 7J), 20% (BAP20 à 7J), 16,83% (BAP5 à 28J), 11,52% (BAP10 à 28J) et par 18,35 (BAP20 à 28J).
- L'augmentation du taux de substitution de ciment par filler calcaire de 10% à 20% n'a pas un grand effet sur la variation de la résistance en traction. Nous remarquons un accroissement de résistance de 0.83 MPa pour BAP5, 0.59 MPa pour BAP10 et 0.55 MPa pour BAP20 à 7Jours et 1.15 MPa pour BAP5, 0.65 MPa pour BAP10 et 0.89 MPa pour BAP20 à 28 jours.

iii) Influence de la finesse du filler:

La résistance à la traction par flexion augmente d'autant plus que la finesse du filler calcaire est importante. Les BAP formulés avec le filler calcaire UF5 (le plus fin) présentes les meilleures résistances.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

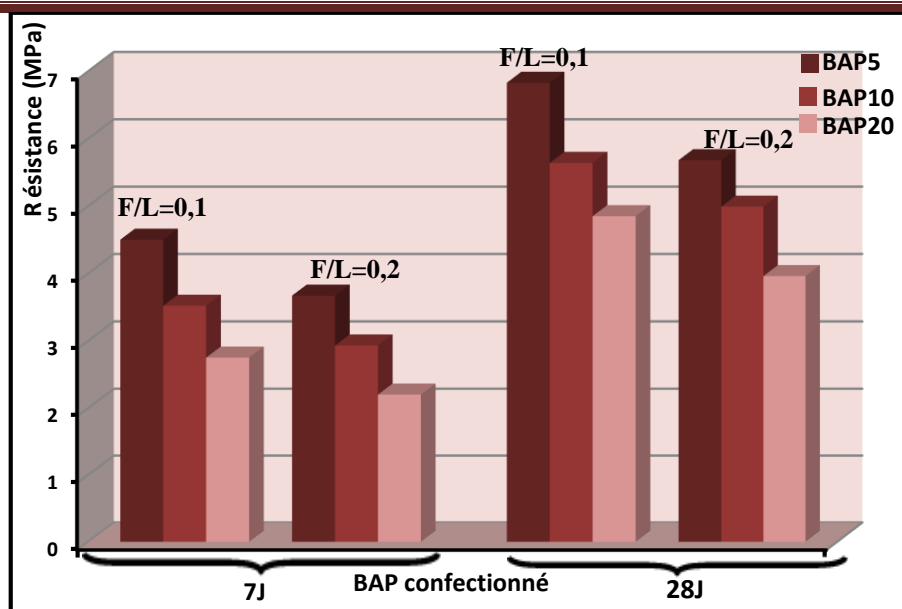


Figure II-2-9: Influence de la finesse du filler sur la résistance à la traction des différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours.

II-2-3 Variation dimensionnelle et pondérale :

Au cours de cette partie, nous étudions les variations dimensionnelles et pondérales [Retrait (Gonflement) et Perte (Gain) en masse] des différents bétons. Pour chaque essai, nous analysons l'influence de quelques paramètres tel que : la finesse de filler calcaire (UF5, UF10, F20), la teneur en de filler (10% et 20%) et le mode de conservation (Ambiant, Couvert, immersion dans l'eau).

Les mesures sont effectuées longitudinalement à un jour après coulage, sur 54 éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm³ munies de plots à leurs extrémités à l'aide d'un rétractomètre. Dix-huit d'entre elles sont conservées dans un milieu permettant un échange hydrique libre avec le milieu extérieur (salle à 20°C et 50% de HR), dix-huit autres éprouvettes conservées dans un milieu sans aucun échange hydrique (couvertes) et les dix-huit dernières sont immergées dans l'eau.

Les relevés des valeurs de variation dimensionnelles et pondérales ont débuté à l'âge d'un jour et sont effectués ensuite avec une périodicité qui augmente avec le temps. Les mesure de retrait (Gonflement) sont effectuées à l'aide d'un rétractomètre à comparateur digital (précision $\pm 0,02$ mm). En ce qui concerne les pesées, elles ont été effectuées sur une balance électrique de précision $\pm 0,01$ gramme.

Le suivi dans le temps, du retrait (gonflement) et de perte (gain) en masse a donné des résultats qui ont permis de tracer les courbes, en abscisse le temps et en ordonné le retrait. Chaque point de la courbe représente la moyenne de trois mesures.

II-2-3-1 Etude paramétrique de retrait:

Les paramètres susceptibles d'influencer le retrait sont variés. Certains concernent la formulation du béton, d'autres l'environnement et les conditions de maturation.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Le but de cette étude paramétrique est d'apporter des connaissances en expliquant le comportement du BAP vis-à-vis les variations dimensionnelles et pondérales. En fonction de la variation des paramètres suivants : le mode de conservation, le taux de substitution de ciment par du filler calcaire et la finesse de filler calcaire.

L'analyse des courbes montre que pour tous les BAP confectionnés et pour tous les modes de conservations, On observe deux phases pour la variation dimensionnelle, la premièrement, la variation se développe rapidement dans les premiers jours. Par la suite, on observe une diminution de la vitesse de développement de retrait (gonflement) et la courbe s'infléchit.

L'analyse des courbes montre que pour tous les BAP confectionnés et pour tous les modes de conservations, On observe deux phases pour la variation dimensionnelle, la premièrement, la variation se développe rapidement dans les premiers jours. Par la suite,

a)Influence du mode de conservation:

En pratique, les échantillons testés en laboratoire pour évaluer les différentes déformations du béton durci sont conditionnés selon trois méthodes différentes :

- L'une consiste à sceller les éprouvettes pour éviter tout départ d'eau et permettre ainsi aux réactions d'hydratation de se poursuivre. Ces échantillons permettront de mesurer le retrait endogène.
- La deuxième, laisse les éprouvettes libres de tout échange hydrique avec l'extérieur et conduit au retrait total.
- La troisième, les éprouvettes sont immergées dans l'eau, conduisant au gonflement.

Conventionnellement, Il est admis de soustraire le retrait endogène au retrait total pour obtenir le retrait de dessiccation, qui n'est pas une déformation concrètement mesurable, sa valeur n'est qu'une estimation approximative.

Nous avons tracé la variation dimensionnelle des différents bétons étudiés (1BAP5, 1BAP10, 1BAP20, 2BAP5, 2BAP10, 2BAP20) durant la phase de maturation à l'air libre, en milieu couvert et sous l'eau,

- Mode Ambient (air libre): Retrait total, ($T=20\pm 2\text{ c}^\circ$, $HR= 50\pm 5\%$),
- Mode Couvert: Retrait endogène, ($T=20\pm 2\text{ c}^\circ$, $HR= 80\pm 5\%$),
- Mode Saturé : Gonflement, ($T=20\pm 2\text{ c}^\circ$, sous eau),

Les déformations des bétons testés sont portées en fonction du mode de conservation sur les figures (II-2-10 jusqu'à II-2-15) pour une période de 90 jours.

Nous observons que les éprouvettes ayant subi une conservation en mode ambient exhibent un retrait supérieur par rapport aux deux autres modes de conservation (couvert et dessiccation). Exception pour le mode saturé ou nous avons remarqué un gonflement.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

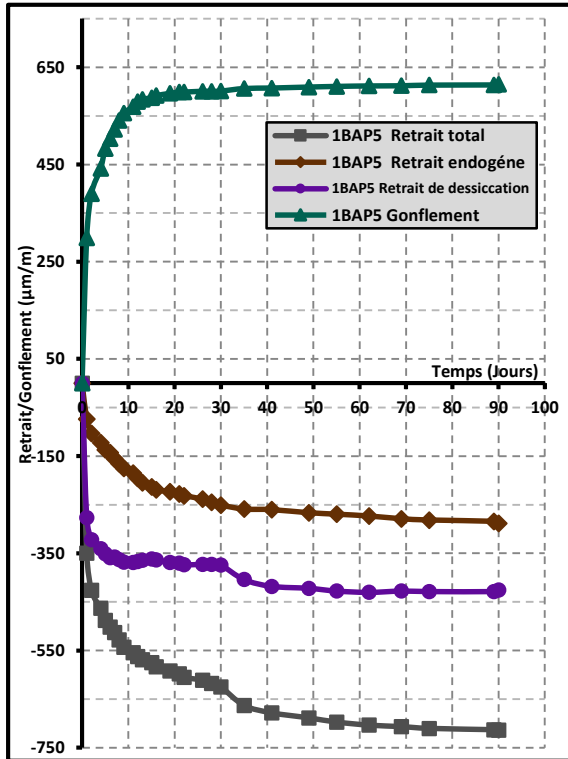


Figure II-2-10: Influence du mode de conservation sur les variations dimensionnelles de 1BAP5.

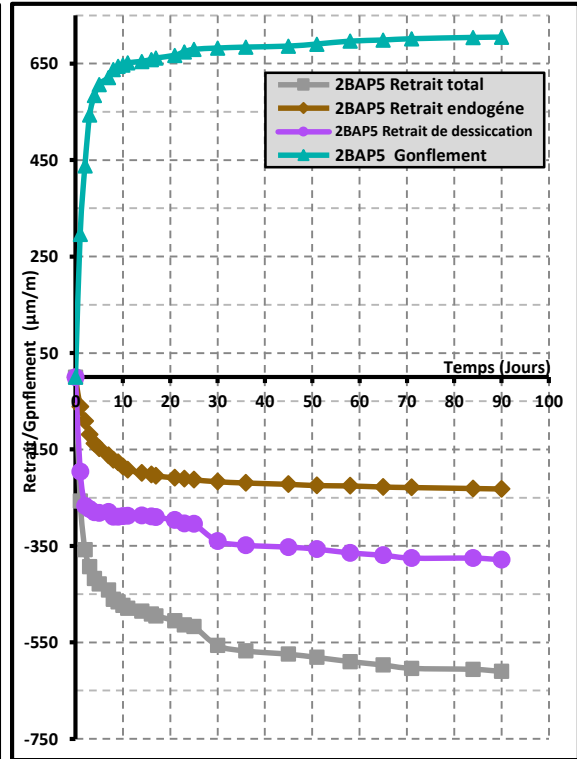


Figure II-2-11 : Influence du mode de conservation sur les variations dimensionnelles de 2BAP5.

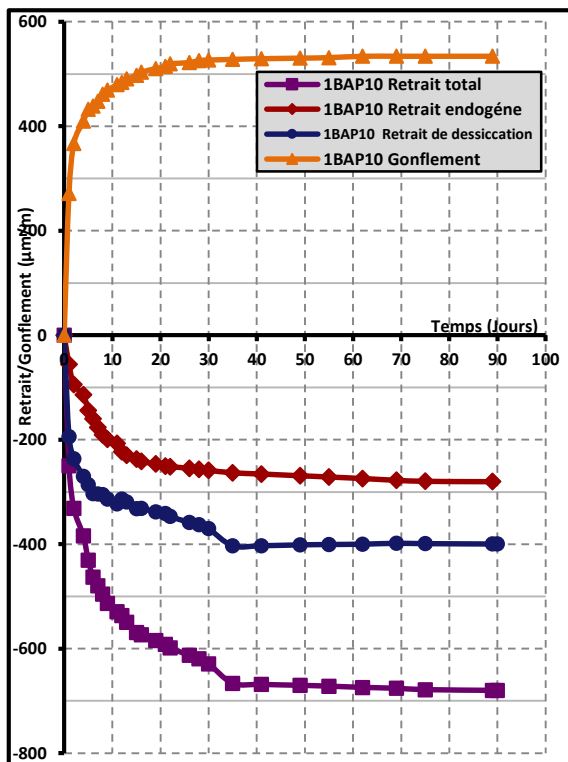


Figure II-2-12 : Influence du mode de conservation sur les variations dimensionnelles de 1BAP10.

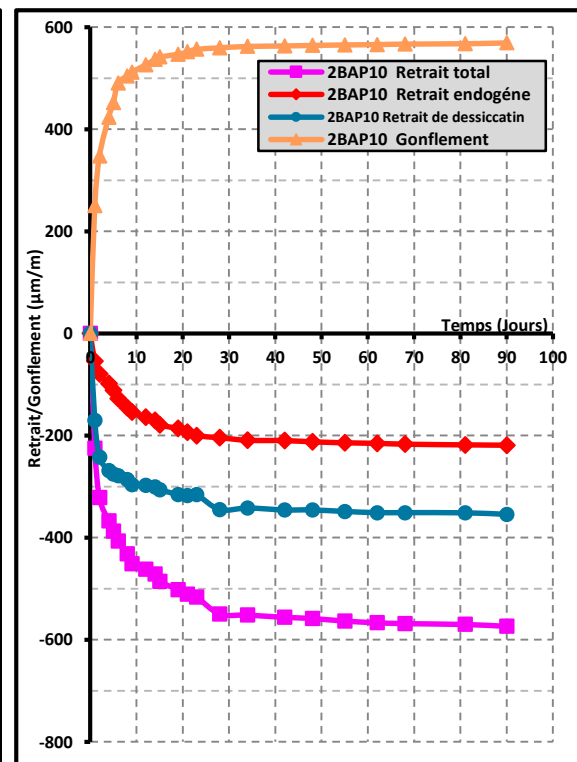


Figure II-2-13 : Influence du mode de conservation sur les variations dimensionnelles de 2BAP10.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

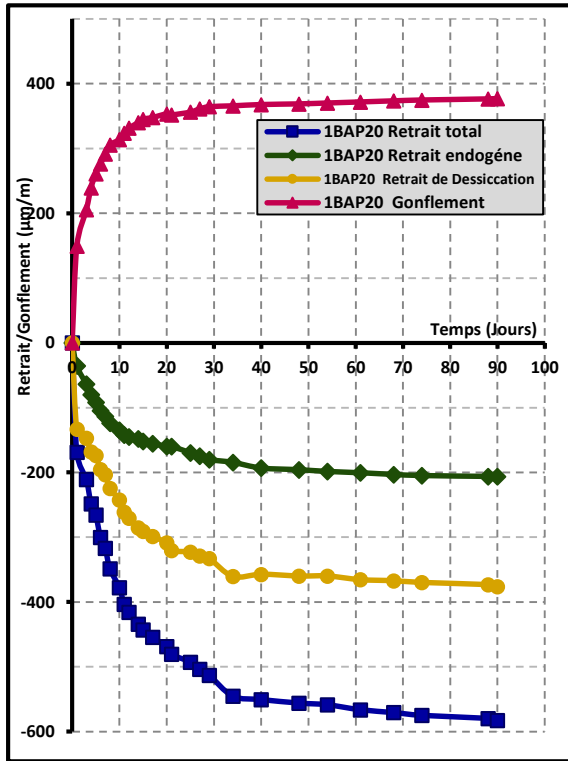


Figure II-2-14: Influence du mode de conservation sur la variation dimensionnelle de 1BAP20

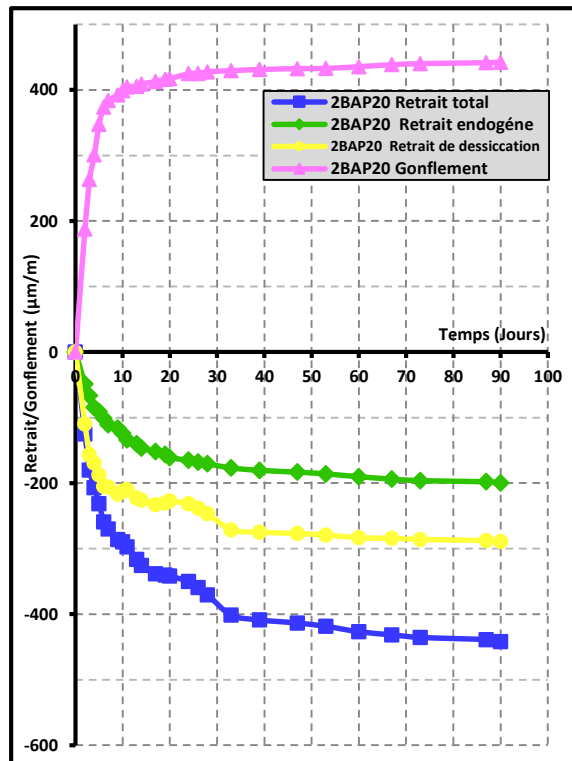


Figure II-2-15: Influence du mode de conservation sur la variation dimensionnelle de 2BAP20

On constate :

- Les éprouvettes conservées en mode couvert ont un retrait inférieur à ceux conservés à l'air libre et à la dessiccation cela est dû à l'exposition des surfaces des éprouvettes en milieu ambiant.
- La diminution entre le retrait total (Mode ambiant) et le retrait endogène (Mode couvert) à 90 jours est de l'ordre de : 59 % pour 1BAP5, 58% pour 1BAP10, 64% pour 1BAP20, 62% pour 2BAP5, 61% pour 2BAP10 et 65% pour 2 BAP20. Il y a très peu de différence entre (1BAP5 et 2BAP5), (1BAP10 et 2BAP10) et (1BAP20 et 2BAP20) environ de 3%.
- Le retrait total est d'environ (2.5) fois plus grand que le retrait endogène et (1.6) fois plus grand que le retrait de dessiccation.
- Les courbes de la Figure (II-2-15) montrent que le taux de rétraction à l'air libre et le taux de gonflement sous l'eau du 2BAP20 sont similaires, on remarque qu'à 90 jours un retrait total de 442 µm/m et un gonflement de 442 µm/m et la même chose pour 2BAP10 où on remarque un retrait total de 573 µm/m et un gonflement de 569 µm/m (Figure II-2-13).

Donc le mode de conservation influe d'une manière significative sur l'évolution du retrait du béton, plus le milieu est humide plus le retrait est de plus en plus faible, donc il est donc important de connaître l'évolution du phénomène retrait dans le temps pour différents modes de conservation.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

b) Influence de la teneur en filler:

i) Retrait total :

Le retrait total englobe, le retrait d'auto dessiccation et le retrait de dessiccation. Par conséquent, dans ce mode de conservation, le retrait dépend à la fois des paramètres intrinsèques matériau mais également des paramètres externes comme la température et l'hygrométrie.

Les figures (II-2-16, II-2-17 et II-2-18) montrent l'évolution du retrait total des bétons autoplaçants testés en fonction du rapport (fillers/ciment+fillers) au bout de 90 jours.

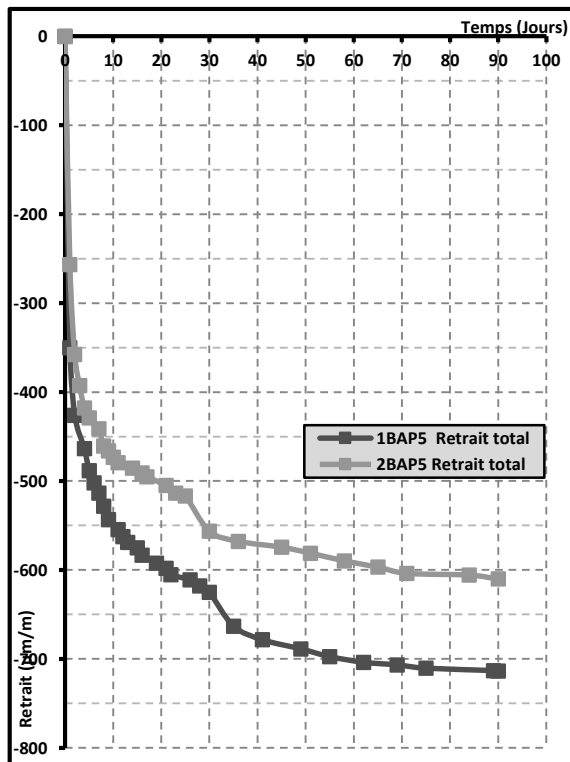


Figure II-2-16: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait total de 1BAP5 et 2BAP5.

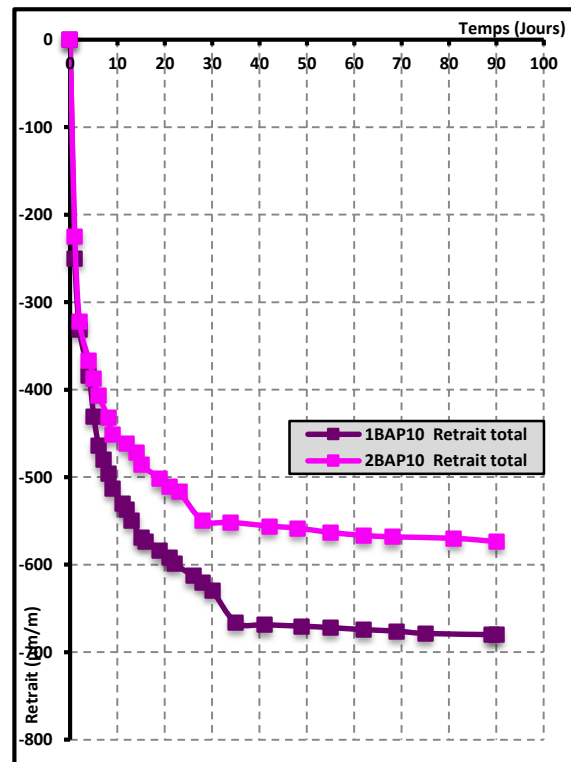


Figure II-2-17: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait total de 1BAP10 et 2BAP10.

- De la figure II-2-16, on remarque que aux 5 premiers jours le 1BAP5 suit une cinétique de retrait pareille à celle de 2BAP5 allant jusqu'à 500 µm/m, mais au-delà de cet âge le retrait du 1BAP5 qui contient un dosage élevé de ciment (540kg/m^3) et moins de filler calcaire (60kg/m^3) continue à se développer plus rapide que celle de 2BAP5 pour atteindre à 90 jours une valeur de retrait total de 713.667, tandis que le 2BAP5 atteint 610 µm/m. Soit un écart de 103.667 µm/m.
- De la figure II-2-17, La comparaison des amplitudes de déformation des 1BAP10 et 2BAP10, montre qu'une part importante de la valeur de retrait total est enregistrée pendant les 10 premiers jours (450 à 500 µm/m). L'ordre de grandeur du retrait total à 90 jours est de 680 µm/m pour le 1BAP10, 573 µm/m pour 2BAP10. Soit un écart de 107 µm/m.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

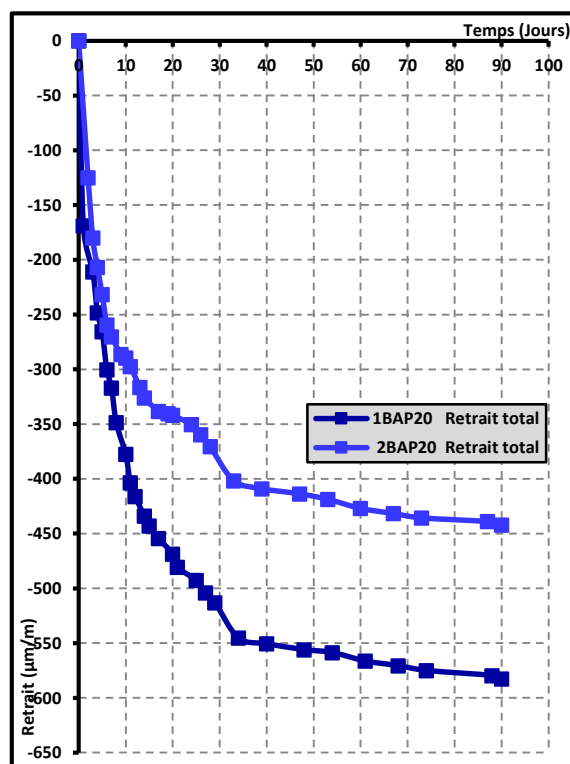


Figure II-2-18: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait total de 1BAP20 et 2BAP20.

Quand on examine les écarts, entre les deux BAP, à 7, 30 et 90 jours, suivant la figure II-2-18, on observe qu'aux 7 premiers jours, les 1BAP20 et 2BAP20 ont la même cinétique de retrait. A 30 jours, la déformation du retrait totale présente un écart très important en faveur des 2BAP20 qui atteint 385 $\mu\text{m}/\text{m}$. À 90 jours, l'écart entre 2BAP20 et 1BAP20 est de l'ordre de 28%.

L'observation de ces données expérimentales révèle les constatations suivantes :

- Les BAP (2BAP5, 2BAP10, 2BAP20) avec un dosage de filler calcaire de (20%), ont un comportement différent par rapport aux BAP (1BAP5, 1BAP10, 1BAP20) avec un dosage de (10%).
- A l'air libre, les fillers ont un effet positif, le BAP contenant plus de fillers présente moins de retrait.

ii) Retrait endogène :

Pour le mode de conservation couvert, le retrait endogène ne dépend que des paramètres intrinsèques du matériau : réactions chimiques, chaleur d'hydratation et composition du béton. Les BAP comparés ne diffèrent que par la teneur des fillers calcaires. Toute différence de comportement donc ne pourra être imputée qu'à ce paramètre.

Les figures (II-2-19), (II-2-20) et (II-2-21) présentent l'évolution dans le temps du retrait endogène des BAP en fonction du rapport (Filler/Filler+Ciment) au bout de 90 jours.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

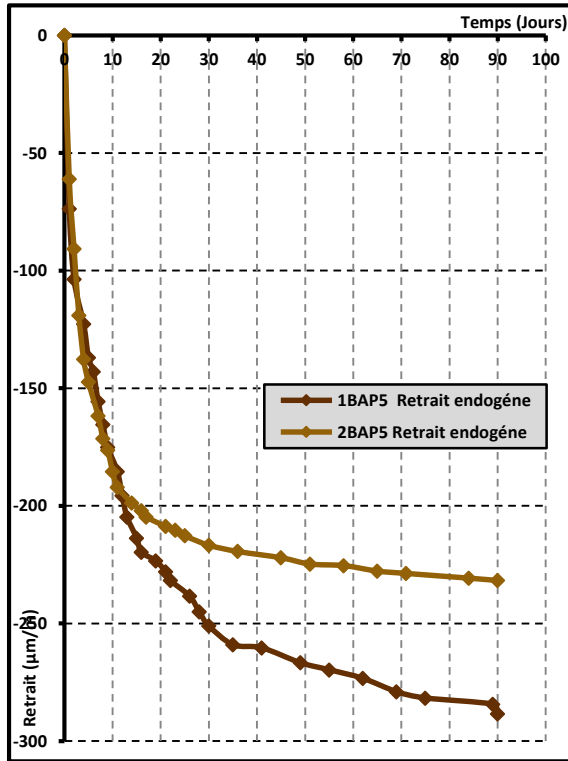


Figure II-2-19: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait endogène de 1BAP5 et 2BAP5.

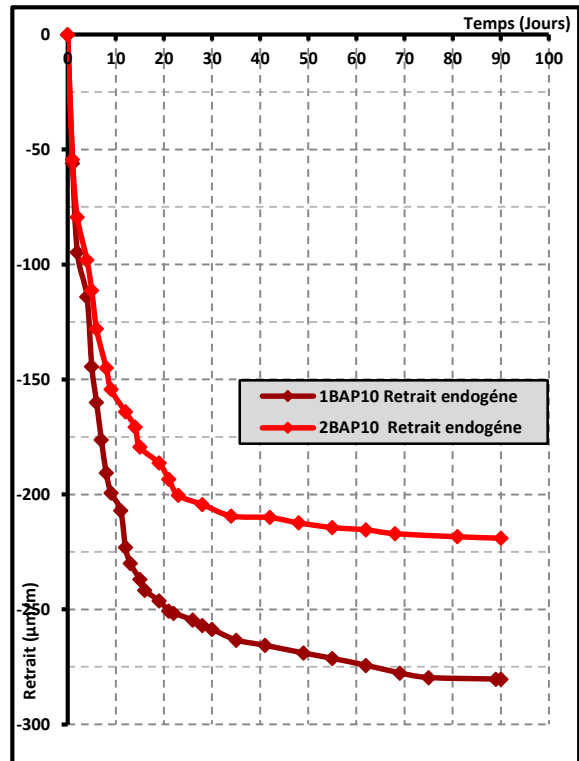


Figure II-2-20: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait endogène de 1BAP10 et 2BAP10.

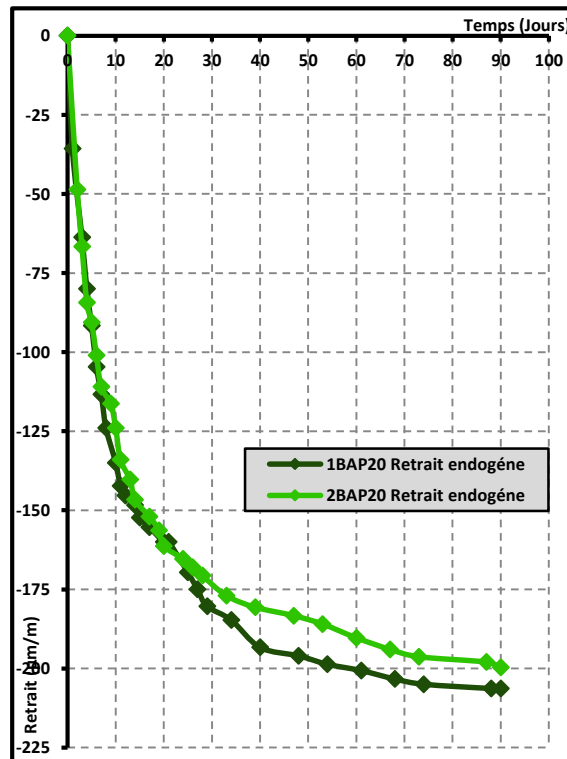


Figure II-2-21: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait endogène de 1BAP20 et 2BAP20.

En analysant les figures présentées ci-dessus, nous tirons les constatations suivantes :

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

- Quel que soit le rapport (F/L) utilisé (10% et 20%), les courbes du retrait sont approximativement les mêmes dans les 20 premiers jours. Au-delà de cette date, les deux courbes commencent à se distinguer, le retrait continue son ascension jusqu'à l'âge de 90 jours et il se stabilise.
- L'ordre de grandeur du retrait endogène à 90 jours est de :
 - * 288.333 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le 1BAP5, 231.667 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour 2BAP5. Soit un écart de 56.663 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ce qui correspond à une réduction de 20 %.
 - * 280.333 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le 1BAP10, 219 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour 2BAP10. Soit un écart de 61.333 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ce qui correspond à une réduction de 21 %.
 - * 206.333 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le 1BAP20, 199 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour 2BAP5. Soit un écart de 7 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ce qui correspond à une réduction de 3 %.

La comparaison des amplitudes de retrait endogène des BAP montre que, les formulations à faible rapport (F/L=10%) ont un retrait endogène important par rapport aux formulations avec un rapport (F/L=20%), ceci s'explique par la substitution de ciment par filer calcaire en minimisant la chaleur d'hydratation.

iii) Retrait de dessiccation :

Le retrait de dessiccation est calculé par soustraction du retrait endogène au retrait total ; sa valeur n'est qu'une estimation approximative. Les figures (II-2-22), (II-2-23), (II-2-24) représentent l'évolution des déformations dues au retrait de dessiccation pour nos six BAP au bout de 90 jours d'âge. On tenant compte du rapport (F/L) comme paramètre.

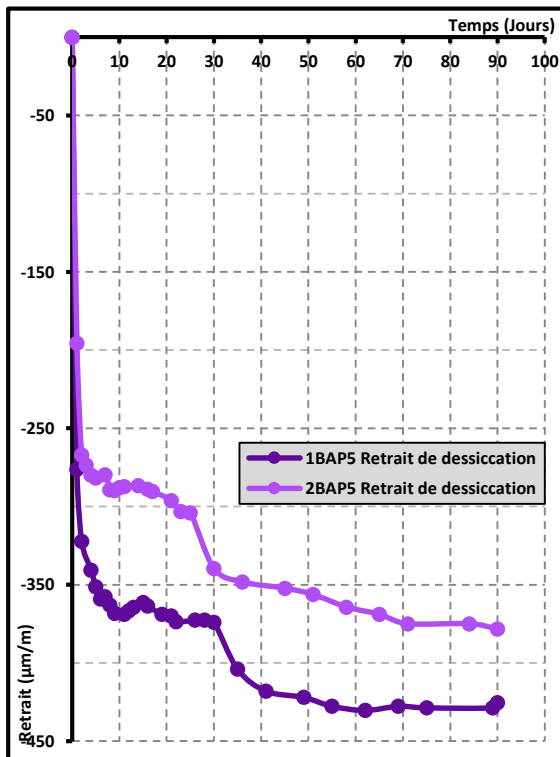


Figure II-2-22: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait de dessiccation de 1BAP5 et 2BAP5.

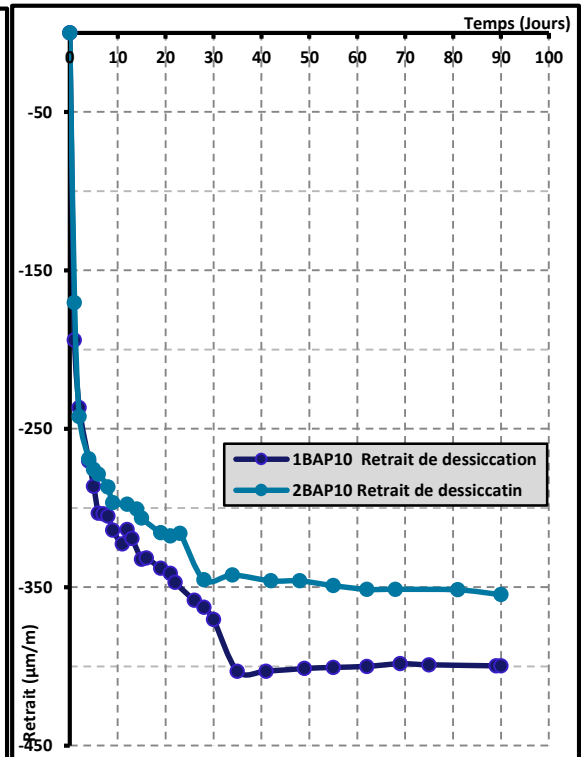


Figure II-2-23: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait de dessiccation de 1BAP10 et 2BAP10.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

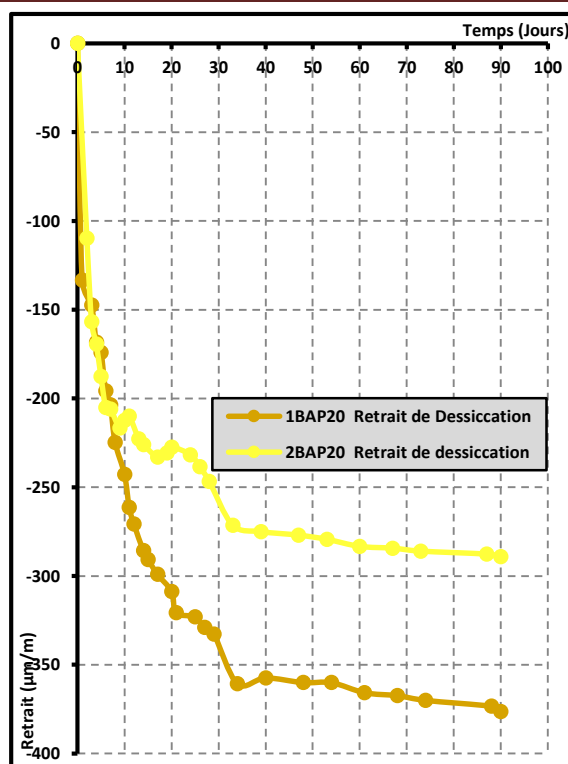


Figure II-2-24: Influence du taux de filler calcaire sur le retrait de dessiccation de 1BAP20 et 2BAP20.

Le retrait peut être considéré comme dû uniquement à l'évaporation de l'eau contenue dans la pâte de ciment hydraté et qui se développe à partir des surfaces exposées à l'ambiance extérieure.

La comparaison des évolutions des déformations de retrait de dessiccation a révélé :

- Le développement du retrait de dessiccation est beaucoup plus progressif pour les BAP contenant plus de filler calcaire,
- Le retrait de dessiccation diminue quand le rapport F/L augmente, quel que soit le filler calcaire utilisé (UF5, UF10, F20),
- Un écart de 47 $\mu\text{m/m}$ est observé entre les 2 formules (1BAP5 et 2BAP5), 45.667 $\mu\text{m/m}$ entre les 2 formules (1BAP10 et 2BAP10) et 87 $\mu\text{m/m}$ entre les 2 formules (1BAP20 et 2BAP20),

iii) Gonflement :

Dans ces conditions d'essai « immersion dans l'eau », Les déformations subies sont des gonflements.

Les figures (II-2-25), (II-2-26), (II-2-27) montrent l'évolution du gonflement des bétons autoplaçants en fonction du rapport (F/L).

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

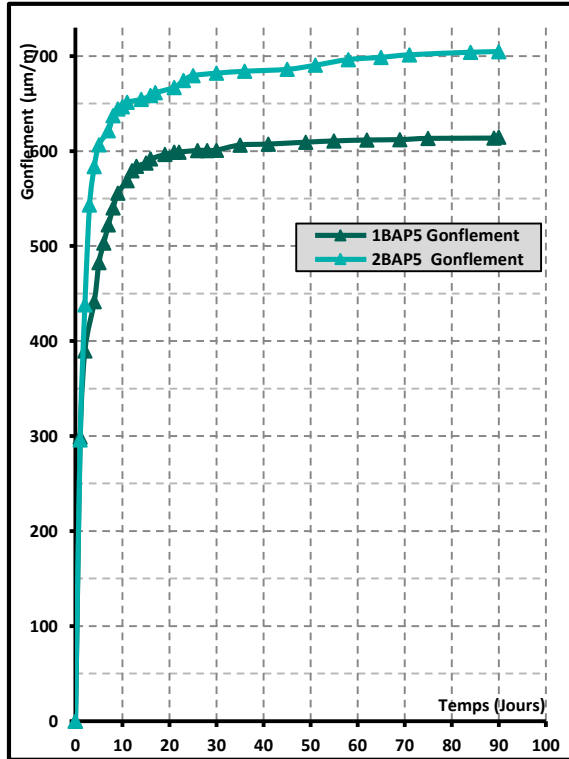


Figure II-2-25: Influence du taux de filler calcaire sur le gonflement de 1BAP5 et 2BAP5.

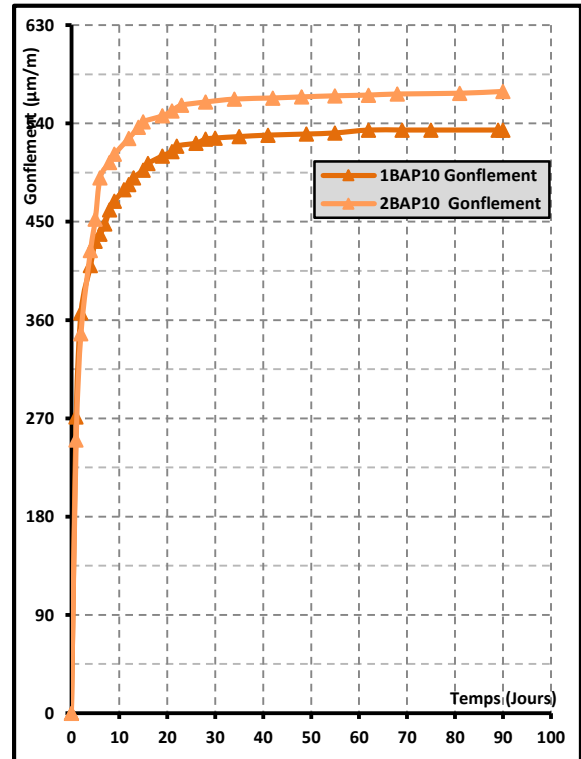


Figure II-2-26: Influence du taux de filler calcaire sur le gonflement de 1BAP10 et 2BAP10.

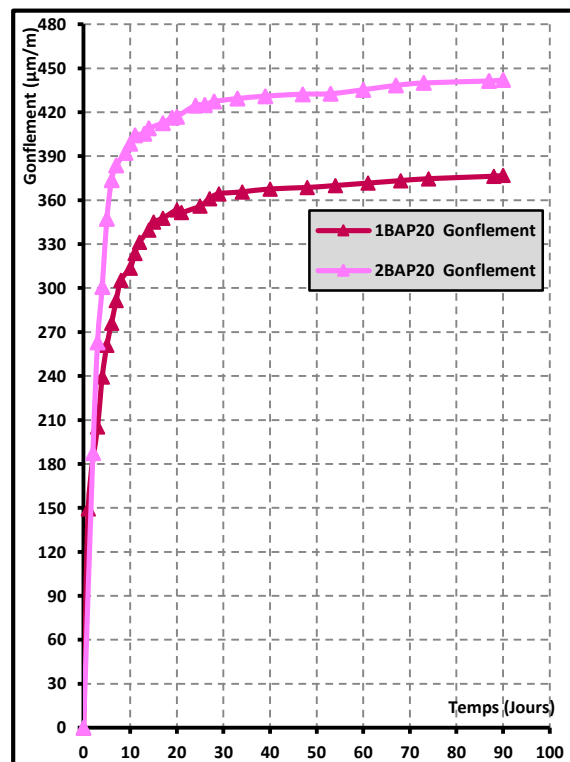


Figure II-2-27: Influence du taux de filler calcaire sur le gonflement de 1BAP20 et 2BAP20.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

- La cinétique d'eau est traduite par un fort gonflement dans les premiers jours suivi par une stabilisation après 30 jours.
- Le développement du gonflement est beaucoup plus progressif pour les BAP avec un rapport (F/L=0,2)
- Les BAP confectionnés avec un rapport (F/L=0.2) présentent un aspect plus gonflant dans l'eau par rapport aux bétons autoplaçant avec un rapport (F/L=0,1). Ceci est essentiellement dû au volume important de fillers qu'ils contiennent.
- D'un point de vue quantitatif, l'ordre de grandeur du gonflement à 90 jours est de :
 - * 614.667 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le 1BAP5, 704.667 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour 2BAP5. Soit un écart de 90 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ce qui correspond à un gain de 13 %.
 - * 534 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le 1BAP10, 569.333 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour 2BAP10. Soit un écart de 35 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ce qui correspond à un gain de 6 %.
 - * 377 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le 1BAP20, 442 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour 2BAP5. Soit un écart de 65 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ce qui correspond à un gain de 14 %.

A la suite des résultats de cette étude paramétrique qui montre l'effet du taux de substitution de ciment par 10% et 20% de filler calcaire sur le retrait total, endogène, dessiccation et le gonflement, nous avons tiré les premières conclusions suivantes :

- A l'air libre (retrait total) et en mode couvert (retrait endogène), les fillers ont un effet positif. les BAP contenant plus de fillers calcaire (20%) présentent moins de retrait,
- L'incorporation des fillers calcaires dans les BAP, contribue à la réduction de chaleur d'hydratation et par conséquent à la diminution le retrait endogène,
- Les BAP contenant plus de fines calcaires (20 %), leurs pâtes possèdent un volume solide plus important engendrant un contact entre les particules plus important induisant moins de retrait,
- Mais c'est tout à fait le contraire pour le gonflement, les BAP formulés avec (F/L=20%) présentent des gonflements supérieurs aux celles avec (F/L=10%) et cela due à la quantité importante des fines.

Des résultats équivalents ont été obtenus par [B. BOUKNI, H. HOUARI, 2010] (Setter et Coll et Van, 1999), (Manai, 1995), cité à [Ph.Turcry, 2004], [Ph.Turcry, 2004], [N. Bouhamou, N. Belas, H. Mesbah, R. Jauberthie, A. Ouali et A. Mebrouki, 2013]. Ces auteurs expliquent que :

- Les pâtes contenant plus fillers possèdent un volume de solide plus important: le contact entre les particules est plus important induisant moins de retrait.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

- Pour les éprouvettes conservées dans l'eau, le béton avec un dosage élevé de fillers subit un gonflement supérieur. Cela est probablement dû à l'absorption de l'eau par les fillers.

c) Influence de la finesse du filler calcaire :

i) Retrait total :

Les Figures présentent l'évolution du retrait total du BAP pour trois finesses de filler calcaire UF5, UF10, F20 jusqu'à 90 jours.

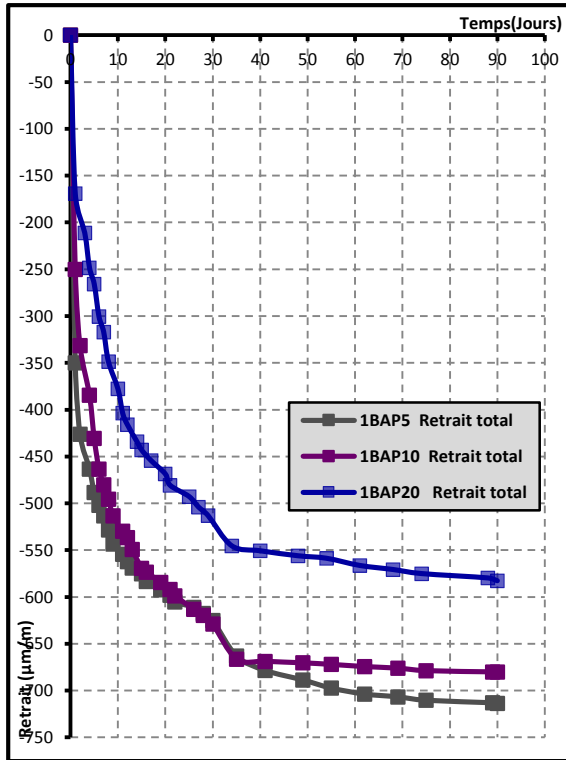


Figure II-2-28: Influence de la finesse de filler calcaire sur le retrait de total de 1BAP5, 1BAP10 et 1BAP20.

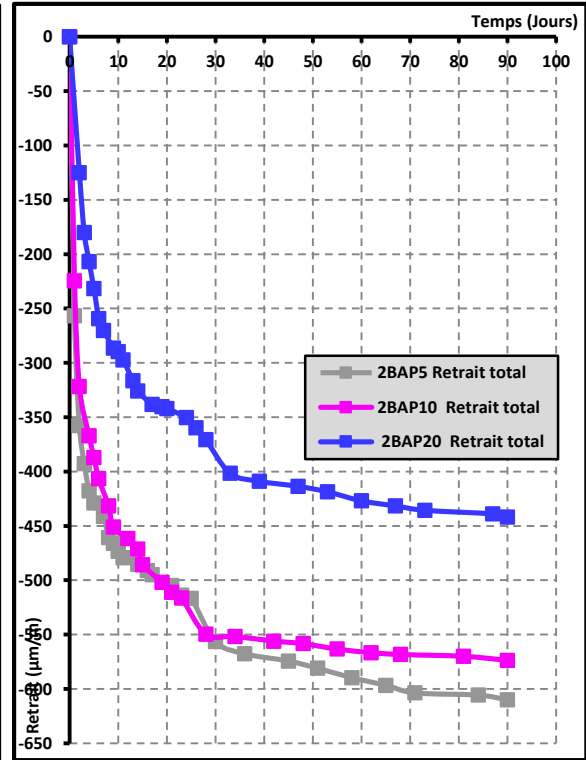


Figure II-2-29: Influence de la finesse de filler calcaire sur le retrait de total de 2BAP5, 2BAP10 et 2BAP20.

De la figure II-2-28, et d'un point de vue quantitatif, les valeurs expérimentales du retrait total sont : 713.667 $\mu\text{m/m}$ pour le 1BAP5, 680 $\mu\text{m/m}$ pour 1BAP10 et 582.667 $\mu\text{m/m}$ pour le 1BAP20. Les valeurs de retrait total obtenues, à 90 jours, pour les trois autres formulations qui sont illustrées par la figure II-2-29 sont : 610 $\mu\text{m/m}$ pour le 2BAP5, 573 $\mu\text{m/m}$ pour 2BAP10 et 442 $\mu\text{m/m}$ pour le 2BAP20.

L'observation de résultats expérimentaux révèle :

- des retraits totaux équivalents pour les deux BAP (1BAP5 et 1BAP10) et aussi pour (2BAP5 et 2BAP10). Cette différence n'est pas significative (un écart d'environ 35 $\mu\text{m/m}$).
- une différence significative entre les retraits totaux du 1BAP5 et 1BAP20 (aussi entre le 2BAP5 et 2BAP20), et montre que le retrait total du 1BAP10 (1BAP20) est légèrement plus faible que celui du 1BAP5 (2BAP5), Cet écart peut être vu comme la conséquence de la différence de la finesse.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

i) Retrait endogène :

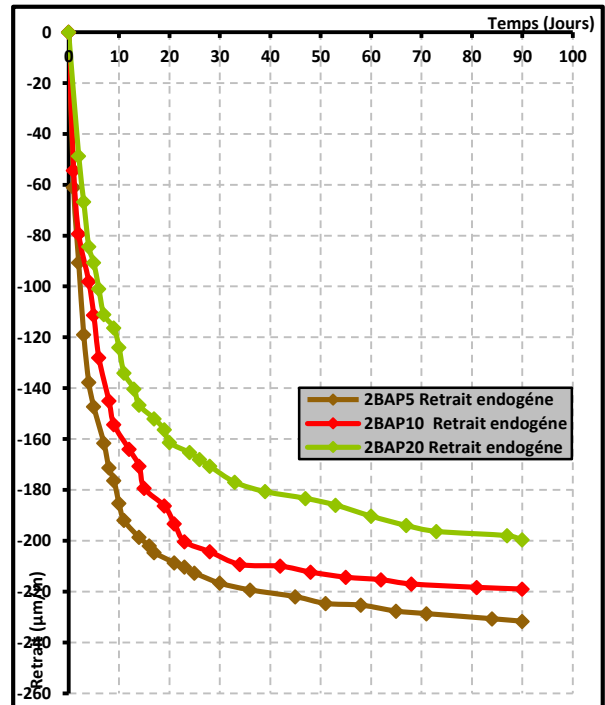
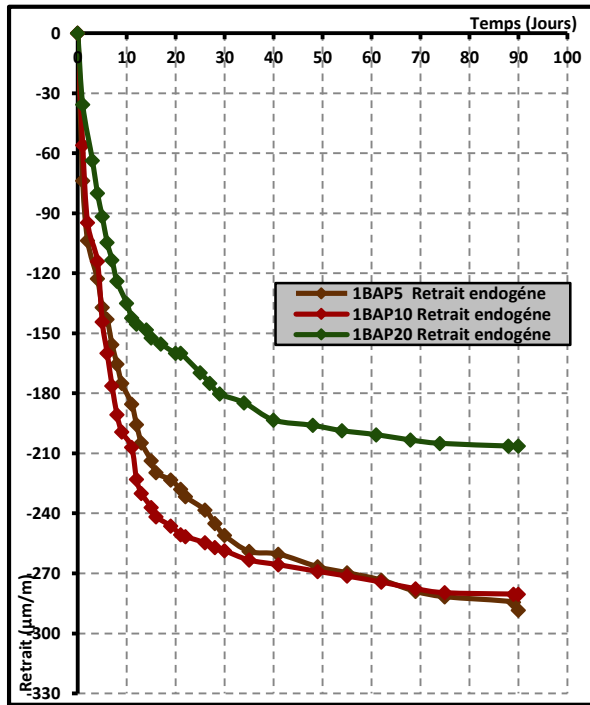


Figure II-2-30: Influence de la finesse de filler calcaire sur le retrait total de 1BAP5, 1BAP10 et 1BAP20.

Figure II-2-31: Influence de la finesse de filler calcaire sur le retrait total de 2BAP5, 2BAP10 et 2BAP20.

L'analyse des courbes des figures ci-dessus montre que l'allure de l'augmentation du retrait endogène des trois bétons est similaire, le retrait endogène du béton 1BAP10 durant 90 jours d'essai est légèrement inférieur à celui de 1BAP5. A 90 jours de suivi, l'ordre de grandeur du retrait endogène est de 206.333 $\mu\text{m/m}$ pour le 1BAP20, de 280 $\mu\text{m/m}$ pour le 1BAP10 et 288 $\mu\text{m/m}$ pour le 1BAP5 une différence assez significative de l'ordre de 104 $\mu\text{m/m}$ est constatée entre les 1BAP5 et 1BAP20, et entre le 1BAP20 et 2BAP20

ii) Retrait de dessiccation :

A partir des retraits total et endogène mesurés sur les éprouvettes, un troisième retrait peut être calculé par différence entre ces deux retraits.

Sur les figures, nous avons illustré le retrait de dessiccation des BAP en fonction de la finesse de filler calcaire. On observe :

- Le développement du retrait de dessiccation est beaucoup plus progressif pour les BAP confectionnés avec le filler fins (UF5),
- Le retrait de dessiccation diminue quand la finesse de filler calcaire augmente, quel que soit le dosage de filler calcaire (10% ou 20%),
- Un écart de 25 $\mu\text{m/m}$ est observé entre les 2 formules (1BAP5 et 1BAP10), 23.667 $\mu\text{m/m}$ entre les 2 formules (1BAP10 et 1BAP20) et 49.334 $\mu\text{m/m}$ entre les 2 formules (1BAP5 et 1BAP20),

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

- Un écart de $24 \mu\text{m/m}$ est observé entre les 2 formules (2BAP5 et 2BAP10), $65 \mu\text{m/m}$ entre les 2 formules (2BAP10 et 2BAP20) et $89.334 \mu\text{m/m}$ entre les 2 formules (2BAP5 et 2BAP20),

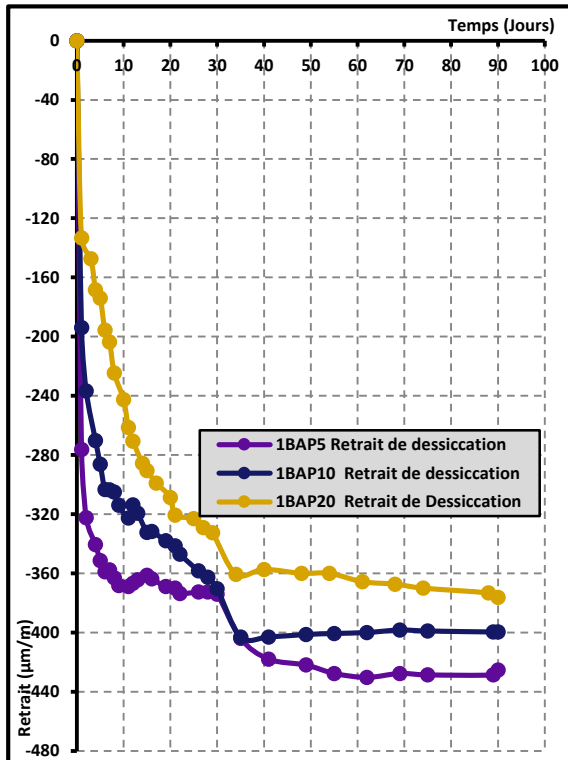


Figure II-2-32: Influence de la finesse de filler calcaire sur le retrait de dessiccation de 1BAP5, 1BAP10 et 1BAP20.

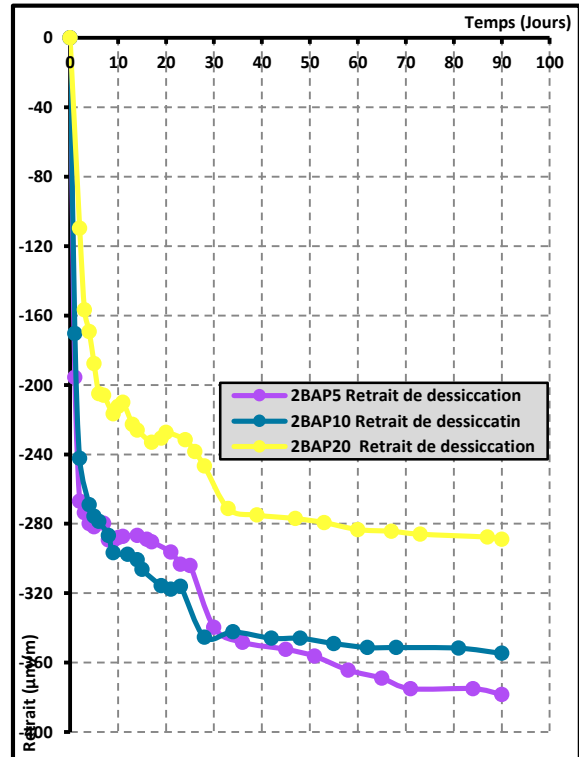


Figure II-2-33: Influence de la finesse de filler calcaire sur le retrait de dessiccation de 2BAP5, 2BAP10 et 2BAP20.

La présence d'additions minérales dans les BAP qui conduit ceux-ci à posséder des pores plus fins que ceux des bétons vibrés. En effet, la pression capillaire étant inversement proportionnelle au rayon des pores, celle-ci est d'autant plus forte dans les BAP, ce qui engendrerait un retrait plus important.

iv) Gonflement :

Les résultats de gonflement issus de notre étude sont sur les figures en fonction de temps.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

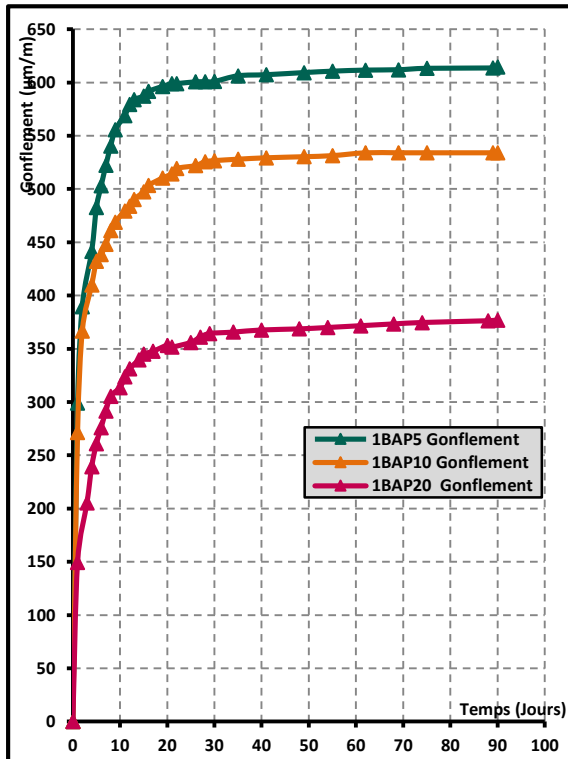


Figure II-2-34: Influence de la finesse de filler calcaire sur le gonflement de 1BAP5, 1BAP10 et 1BAP20.

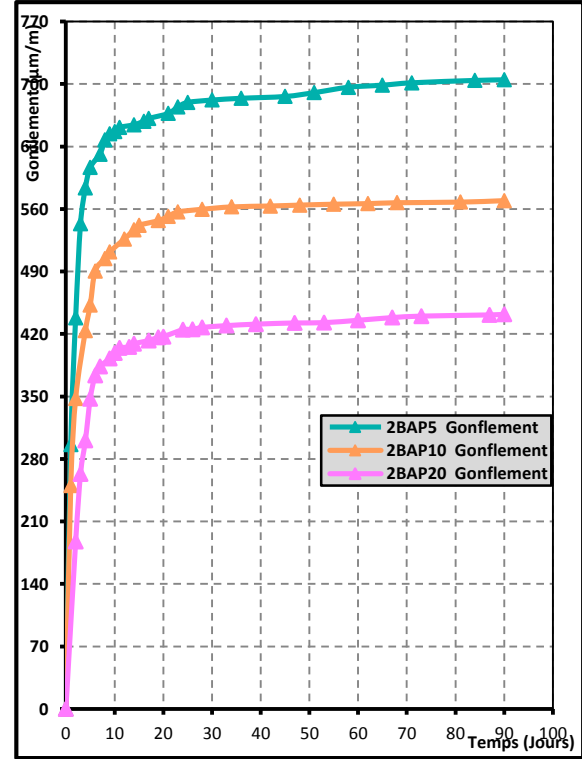


Figure II-2-35: Influence de la finesse de filler calcaire sur le gonflement de 2BAP5, 2BAP10 et 2BAP20.

D'un point de vue quantitatif, la valeur expérimentale du gonflement :

- 1BAP5 contenant le filler calcaire le plus fin (UF5), à 90 jours est de 614.667 $\mu\text{m/m}$. Les valeurs, à la même échéance, pour les deux autre formulations sont les suivantes 534 $\mu\text{m/m}$ pour le 1BAP10 (BAP avec UF10) et 377 $\mu\text{m/m}$ pour le 1BAP20 (BAP avec F20).
- 2BAP5 contenant le filler calcaire le plus fin (UF5), à 90 jours est de 704 $\mu\text{m/m}$. Les valeurs, à la même échéance, pour les deux autre formulations sont les suivantes 569.333 $\mu\text{m/m}$ pour le 2BAP10 (BAP avec UF10) et 442 $\mu\text{m/m}$ pour le 2BAP20 (BAP avec F20).

A la suite des résultats de cette étude paramétrique qui montre l'effet de la finesse du filler calcaire sur le retrait total, endogène, dessiccation et le gonflement, nous avons tiré les premières conclusions suivantes :

L'augmentation du retrait en fonction de la finesse, est due essentiellement à la présence d'une porosité capillaire élevée. Ceci provoque la formation d'une grande quantité de ménisques.

D'après Van cité par [Assié, 2004], les fillers calcaires peuvent avoir un effet positif en limitant le retrait des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée (Hasni 99) cité à [Assié, 2004].

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

d) Retrait total des six bétons étudiés :

Le retrait total des six bétons étudiés est présenté jusqu'à 90 jours sur les figures.

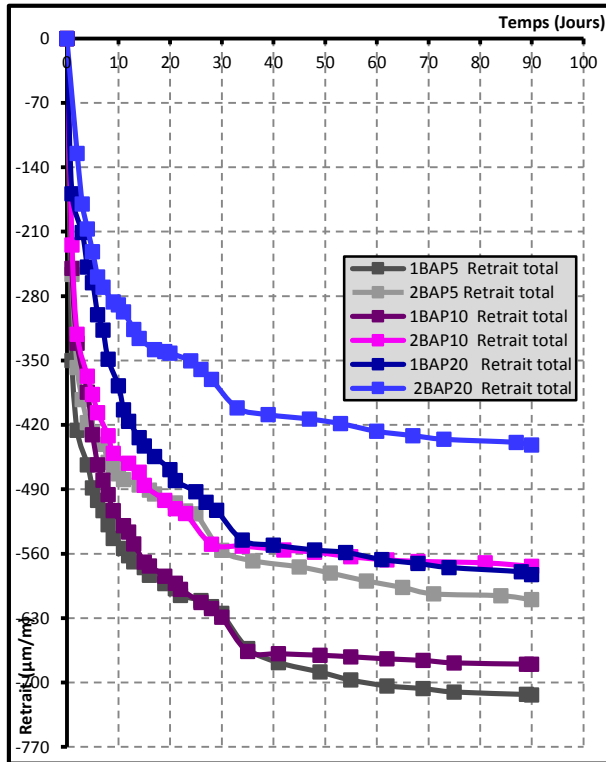


Figure II-2-36 : Retrait des six bétons étudiés dans le milieu Ambiant (Retrait total).

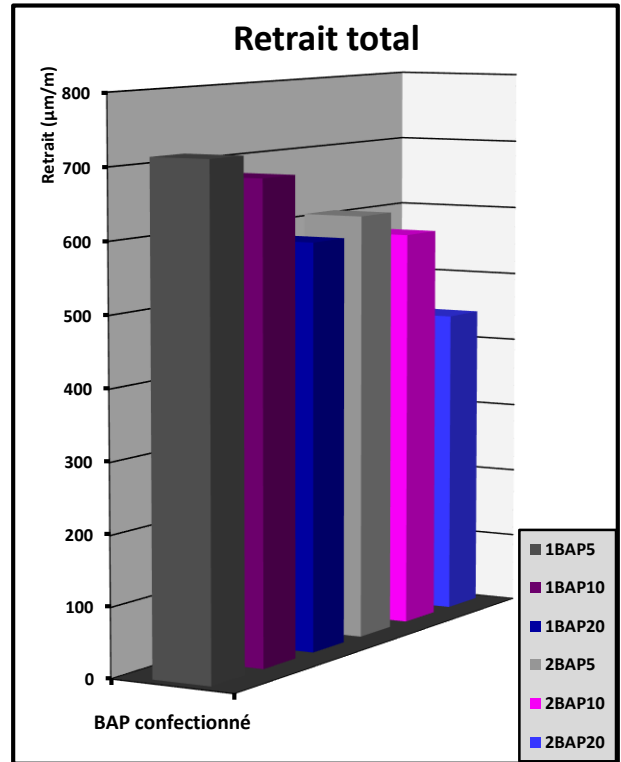


Figure II-2-37 : Histogramme présente le retrait des six bétons étudiés dans le milieu Ambiant (Retrait

Les figures II-2-36 et II-2-37 illustre la différence entre les six BAP conservés à l'air libre, avec moins de retrait pour les BAP contenant plus de fillers calcaires.

Les résultats obtenus, montrés dans la Figure II-2-36, mettent en évidence les constatations suivantes :

- La comparaison des évolutions des déformations de retrait total au jeune âge montre que les courbes sont relativement parallèles traduisant des cinétiques proches quel que soit le BAP. Au-delà de 15 jours les courbes montrent une dispersion importante des cinétiques et des intensités (entre 442 et 713 µm/m) à 90 jours pour respectivement les 2BAP20 (F/L=0.2- filler F20) et 1BAP5 (F/L=0.1- filler UF5)
- Une cinétique rapide du retrait des différents BAP dans les premiers jours. Le 1BAP5 présente une valeur de 713.667 µm/m a à 90 jours. Dont 39 % de cette déformation est atteinte en seulement 7 jours.
- On peut voir que la courbe de retrait total du 1BAP20 est confondue avec celles du 2BAP10.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

e)Retrait endogène des six béton étudiés :

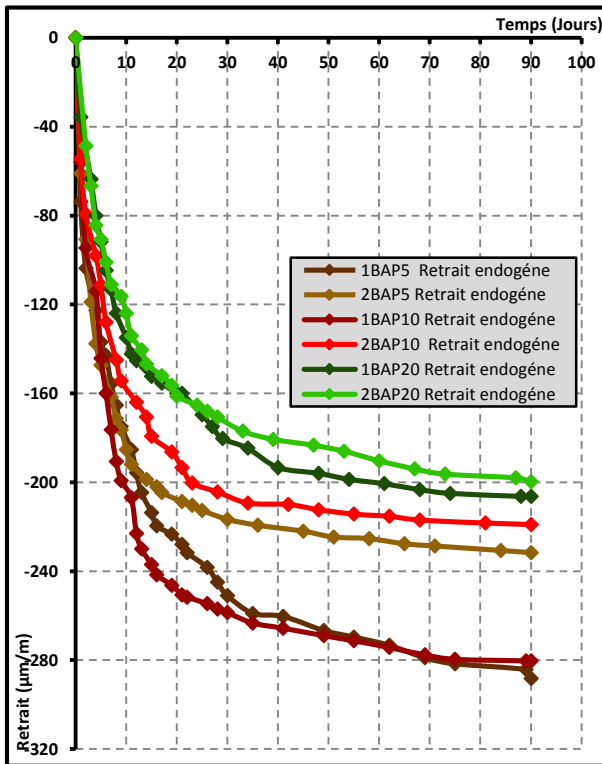


Figure II-2-38: Retrait des six bétons étudiés dans le milieu Couvert (Retrait endogène).

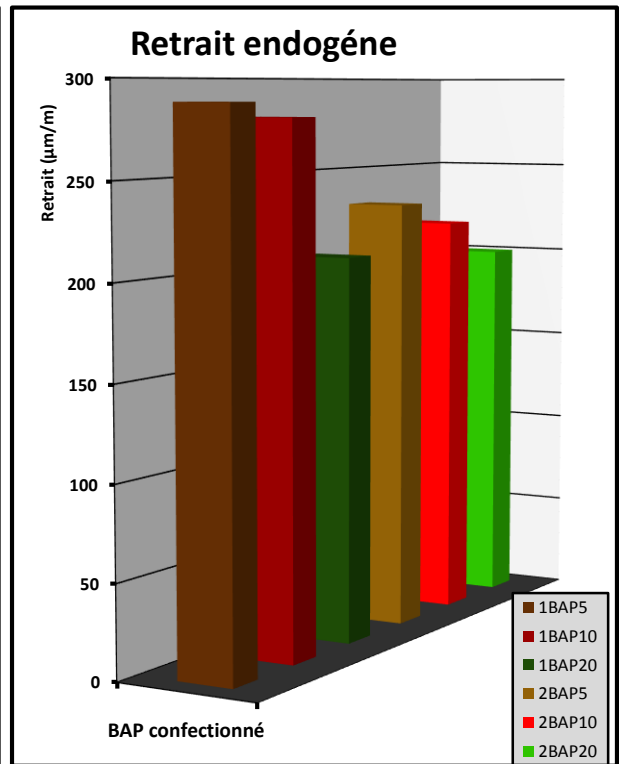


Figure II-2-39 : Histogramme présente le retrait des six bétons étudiés dans le milieu Couvert (Retrait endogène).

La figure II-2-38 et II-2-39 représentent respectivement l'évolution des déformations dues au retrait endogène pour nos six BAP au bout de 90 jours d'âge.

Des prismes (7x7x28) cm scellés ont été utilisés pour les mesures de retrait endogène. Pour le mode de conservation endogène, le retrait ne dépend que des paramètres intrinsèques du matériau : réactions chimiques, chaleur d'hydratation et composition du béton. Les BAP testés ne diffèrent par la finesse des fillers calcaires, (UF5, UF10, F20) et le taux de filler calcaire (10 et 20%). Toute différence de comportement donc ne pourra être imputée qu'à ces paramètres.

- A partir de 20 jours la cinétique du retrait endogène diminue du fait de la stabilisation de l'évolution des réactions d'hydratation.
- L'augmentation de la finesse du filler calcaire entraîne un développement plus important du retrait endogène, parce qu'un filler plus fin à une porosité capillaire formée est plus fine.
- Après trois mois de mesure, les valeurs de déformation de 1BAP5 (288 µm/m) et 1BAP10 (280 µm/m) avec un rapport F/L=0.1 et filler calcaire UF5, UF10 respectivement sont les plus Fortes et ils ont des comportements de retrait endogène assez semblables. Les BAP (2BAP10 et 2BAP20) avec le rapport F/L= 0.2 et les fillers calcaires : UF10 et F20 développent les plus faibles déformations, respectivement de l'ordre de 219 µm/m et 153 µm/m.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

- Enfin, la finesse du filler calcaire semble donc influencer le retrait endogène avec des écarts pouvant atteindre les 80 $\mu\text{m}/\text{m}$ (30%), au bout de trois mois.

f) Retrait de dessiccation des six bétons étudiés:

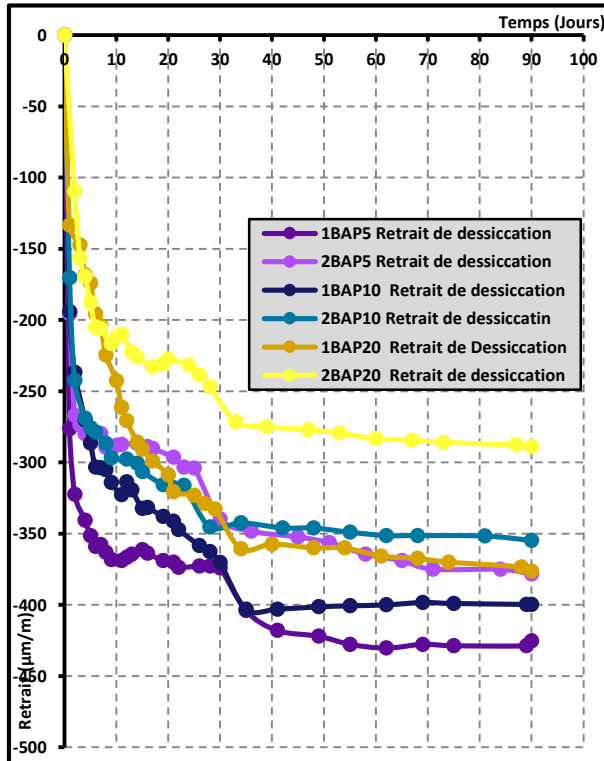


Figure II-2-40 : Retrait des six bétons étudiés dans le milieu Dessiccation (Retrait de dessiccation).

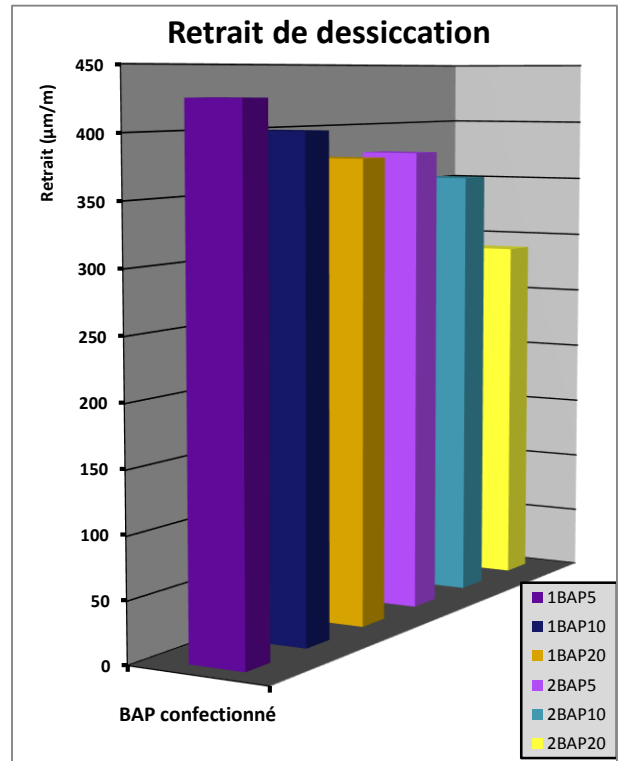


Figure II-2-41 : Histogramme présente le retrait des six bétons dans le milieu Dessiccation.

Nous constatons que

- Le béton qui présente le plus grand retrait est le 2BAP5 qui est caractérisé par un rapport $F/L = 0.2$ et un filler calcaire UF5. Le retrait de dessiccation de 2BAP20 est plus faible que les autres bétons. Ce résultat se corrèle bien avec le rapport F/L .
- Le développement du retrait est beaucoup plus progressif pour les BAP avec un dosage minimal d'additions (filler calcaire), ceci explique que l'augmentation du dosage en filler est un paramètre important pour la réduction du retrait.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

g) Gonflement des six bétons étudiés:

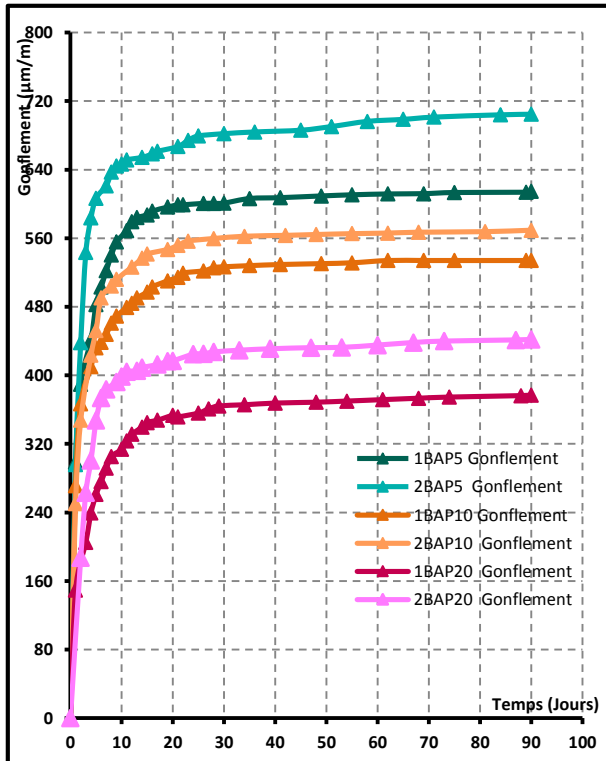


Figure II-2-42 : Retrait des six bétons étudiés dans le milieu saturé (gonflement).

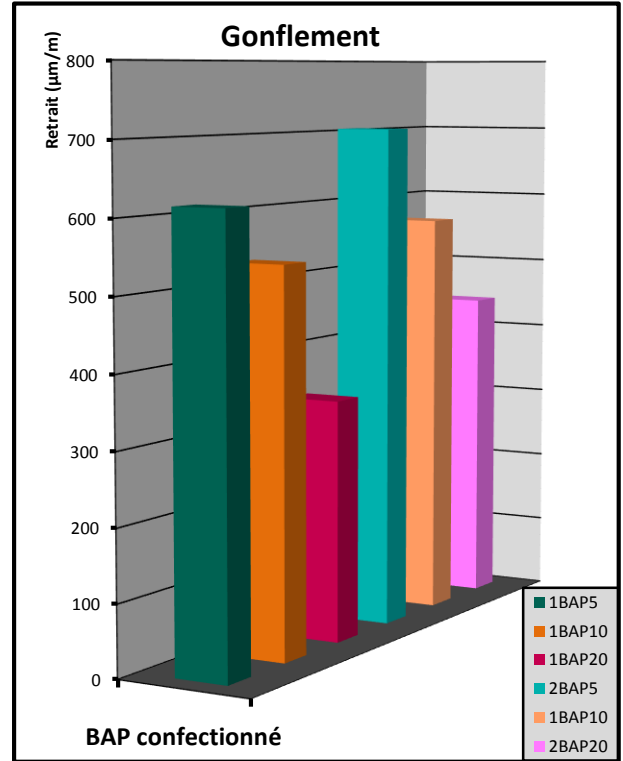


Figure II-2-43 : Histogramme présente le gonflement des six bétons étudiés dans le milieu saturé (gonflement).

L'analyse des courbes de la figure II-2-42 et des résultats rassemblés dans histogramme permet de faire les constatations suivantes :

- La forme des courbes pour les 6 bétons testés est sensiblement identique, même si les pentes sont inévitablement distinctes. Ainsi, l'augmentation de retrait.
- Les éprouvettes immergées dans l'eau, la cinétique d'eau est traduite par un fort gonflement dans les dix premiers jours puis la cinétique commence à être plus lente.
- Le béton qui présente le plus grand retrait est le 2BAP5 qui est caractérisé par un rapport $F/L = 0.2$ et un filler calcaire UF5.

Les histogrammes de les Figures II-2-40, II-2-41, II-2-42, II-2-43 récapitule les valeurs extrêmes. Pour le retrait total, endogène, de dessiccation et le gonflement, selon les résultats de travaux antérieurs de la littérature, les valeurs ce cadre bien avec nos résultats (plage de variation de 30 à 50 µm/m). [Cusson].

Dans un premier temps, la déformation de retrait parait rapide et importante (la cinétique est plus forte au jeune âge pour le 1BAP5 par rapport au 2BAP5) du fait du très fort gradient d'humidité qui existe entre le matériau testé et le milieu extérieur (en particulier pour les éprouvettes conservées à l'air libre où ce gradient est très important).

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Mais par la suite, le séchage étant un processus diffusionnel, sa cinétique devient beaucoup plus lente. Sur la figure II-2-38, nous remarquons que le BAP20 contenant plus de fillers présente moins de retrait. Le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et en proportion adéquates [Turcry 04].

II-2-3-2 Etude de la perte en masse:

Le retrait ne se serait déroulé sans qu'il y ait eu une perte d'eau et par conséquent une perte de masse.

La perte (ou gain) en masse des bétons a été suivie par pesée régulière des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm³ (les mêmes éprouvettes destinées à la mesure du retrait). Les pesées ont été effectuées sur une balance électrique de précision 0,1 gr.

Sur les figures (II-2-44 jusqu'à II-2-47) nous avons présenté l'évolution de la masse des échantillons rapportés aux valeurs initiales de ces derniers pour les différents modes de conservation. La perte (gain) en masse (%) est définie comme la variation de masse rapportée aux valeurs initiales.

Les figures (II-2-44 jusqu'à II-2-47) regroupent les résultats obtenus de la mesure de la perte en poids des six BAP en fonction du temps. Nous constatons trois phases essentielles dans l'évolution de la perte en poids. Dans la première phase, une grande quantité d'eau perdue, dans la deuxième phase une relation non linéaire est observée, dans la troisième une stabilisation des courbes apparaît d'où on remarque une progression très lente de la perte en poids.

Les pertes en poids constatées pendant le durcissement correspondant à l'évaporation de l'eau libre par suite de la différence d'hygrométrie avec l'ambiance extérieure :

- Mode Ambient : $T=20\pm 5^\circ$, $HR= 50\pm 5\%$,
- Mode Couvert : $T=20\pm 5^\circ$, $HR= 80\pm 5\%$,
- Mode de Dessiccation : est la différence entre la perte en masse en Mode Ambient et Mode Couvert.
- Mode Saturé : Dans une salle avec ($T=20\pm 5^\circ$, $HR= 50\pm 5\%$), les éprouvette sont immergées dans l'eau

a) mode ambient :

La figure (II-2-44) représente les courbes de perte en masse en fonction du temps pour les six bétons en mode Ambient à 90 jours

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

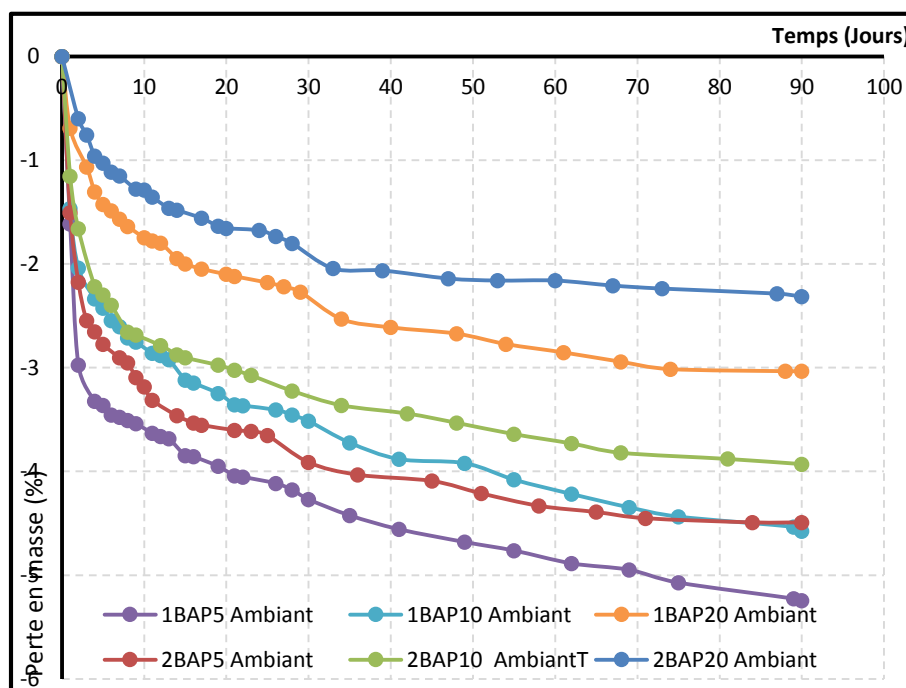


Figure II-2-44 : Variation de la perte en masse (%) des différents BAP en mode Ambient.

A l'air libre, les bétons passent par trois phases. La première phase est linéaire avec le temps, l'enregistrement d'un fort départ d'eau dans les 20 premiers jours est remarqué, représentant plus de 65% de la perte en masse obtenue à 90 jours. Une deuxième phase non linéaire où la vitesse de départ d'eau est très lente, et enfin la dernière phase de stabilisation de la masse.

Nous constatons que les BAP qui contiennent plus de filler calcaire représentent des pertes en masse moins importantes, aussi que les BAP fonctionnés avec les fillers calcaire plus fin ont une perte en masse importante.

b) Mode couvert :

L'évolution de la perte en masse en fonction du temps, jusqu'à une échéance de 90 jours, est présentée sur la figure (II-2-45) en condition isotherme et en supposant qu'il n'y a pas d'échanges hydriques avec l'extérieur.

En milieu couvert, sans échange hydrique avec l'extérieur, les six BAP suivent la même cinétique mais avec des grandeurs différents.

Les trois phases ne sont pas très remarquables. La stabilisation est atteinte au bout de 60 jours pour ces bétons.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

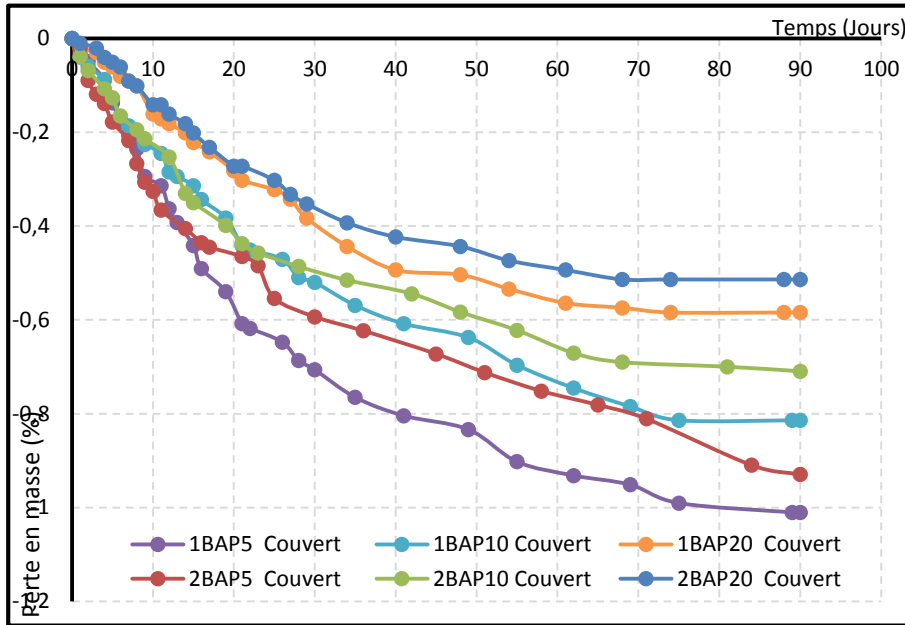


Figure II-2-45 : Variation de la perte en masse (%) des différents BAP en mode Couvert.

Les courbes montrent que la perte en masse est d'autant plus importante que le rapport F/L soit faible. Les BAP avec un rapport (F/L=0.2) présentent une perte de poids plus faible que les BAP avec un rapport (F/L=0.1). Ce rapport joue un rôle important et prédominant dans la diminution de l'humidité relative interne, (BAR 1997) (TAZ 1998) (NAW 2004) cité à [S.Assié, 2004]. Plus ce rapport est faible et plus la diminution de l'humidité relative est importante par autodessiccation et plus la perte en poids est importante. Nous remarquons que, Donc la perte en poids en mode couvert est freinée par la présence de fillers calcaires.

c) Mode dessiccation :

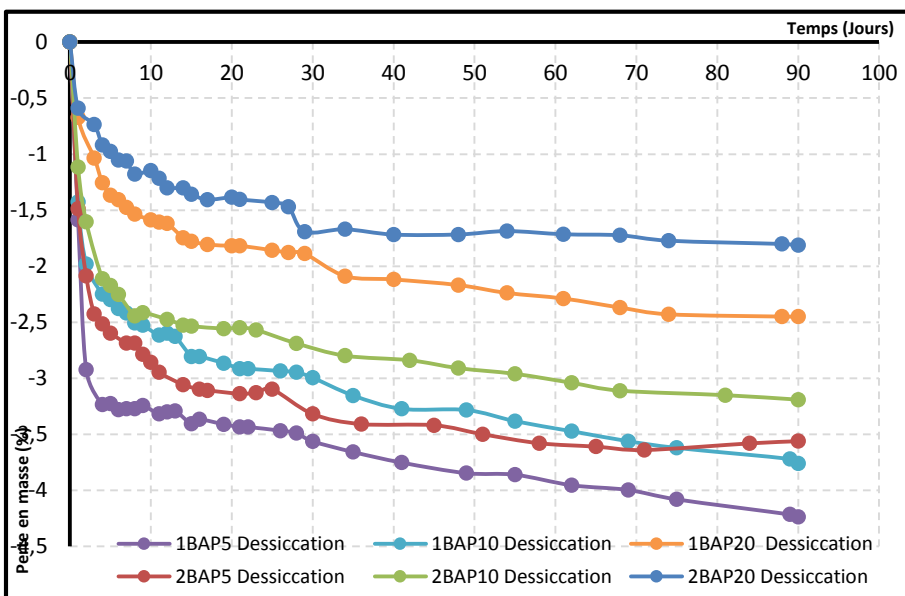


Figure II-2-46 : Variation de la perte en masse (%) des différents BAP en dessiccation.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Sur la figure II-1-45, On remarque que les bétons, en milieu dessiccation présentent pratiquement la même allure de courbes avec des valeurs différentes, et les trois phases paraissent clairement.

La perte en masse diminue quand le rapport F/L augmente, cette diminution est à associer à l'augmentation du filler calcaire, lorsqu'il est substitué au ciment. La présence des de filler calcaire, fait diminuer le retrait de dessiccation, cela est le résultat de leur contribution à l'amélioration de la microstructure.

c) Mode saturé :

La figure suivante, illustre la variation pondérale dans un milieu saturé, ou on a observé un gain en masse.

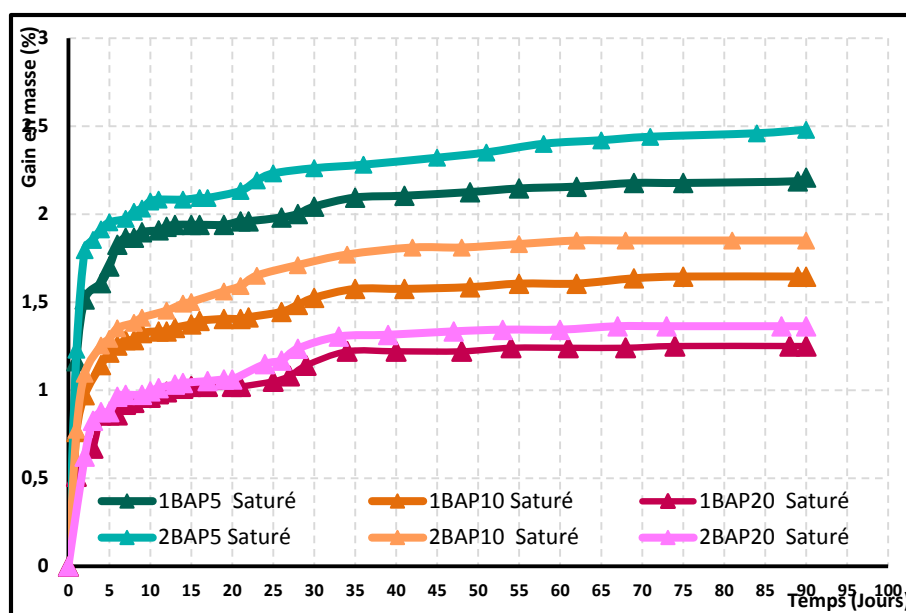


Figure II-2-47 : Variation de la perte en masse (%) des différents BAP en mode saturé.

En milieu immergé dans l'eau, un gain en masse pour tous les bétons a été observé avec des cinétiques différentes en fonction de la finesse de filler calcaire et le rapport F/L.

Le béton qui a présenté le plus grand gonflement est celui qui contient beaucoup de fine : c'est le « 2BAP5 » avec un rapport ($F/L = 0.2$) et un filler calcaire calcaire UF5. Les fillers qui permettaient la réduction du retrait en milieu ambiant et couvert, sont à l'origine de l'augmentation du gonflement dans un milieu immergé.

Les résultats des essais de suivi de la variation dimensionnelle dans l'eau, nous ont permis de constater que les bétons qui présentent un aspect plus gonflant dans l'eau sont les bétons avec un rapport (F/L) important. Ceci est essentiellement dû au volume important de fillers qu'ils contiennent.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE
II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

II-2-3-3 Corrélation perte en masse- retrait :

Après l'analyse brute des données de retrait, nous proposons de corrélérer ces déformations avec la perte en masse.

Nous avons représenté l'évolution de retrait en fonction de la perte de masse sur les figures (II-2-47)

a) Mode Ambient :

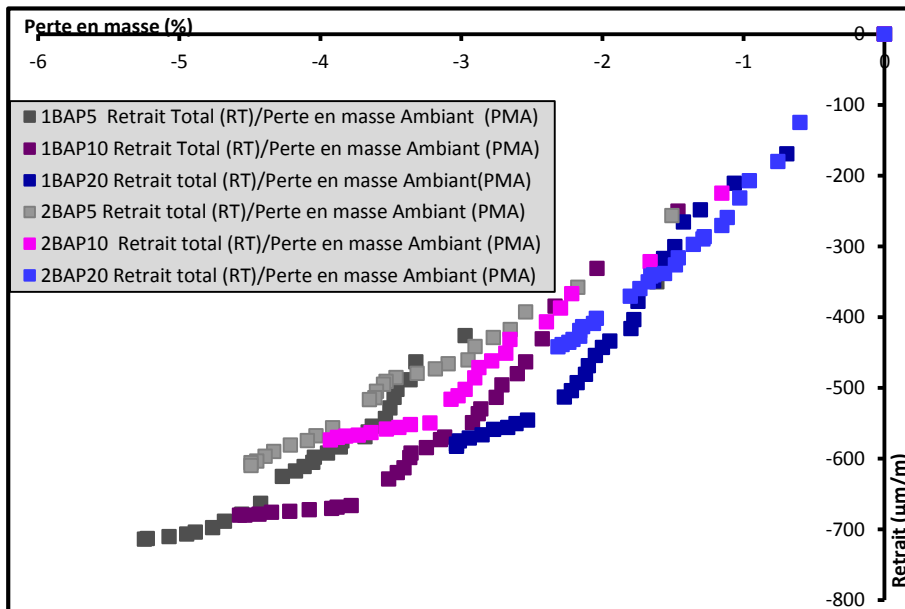


Figure II-2-48: Retrait en fonction de la perte de masse en mode des six bétons à l'air libre

La première observation inscrite à partir de la représentation du retrait total en fonction de la variation de la perte en masse en mode de dessiccation, c'est l'accroissement du retrait total de tous les bétons d'étude en fonction de la variation de la masse. Néanmoins, on examine en premier lieu une perte d'eau élevée qui n'a quasiment aucun effet sur le retrait. Selon [GCI ,09], au début de retrait total, c'est l'eau libre dans les grands pores capillaires ($> 0.05 \mu\text{m}$) qui débute à s'enfuir. Cette perte d'eau affronte partiellement un petit retrait.

Ensuite le retrait est immédiatement relatif à la perte d'eau comme cela présenté sur la figure (II-2-48).

b) Mode couvert :

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

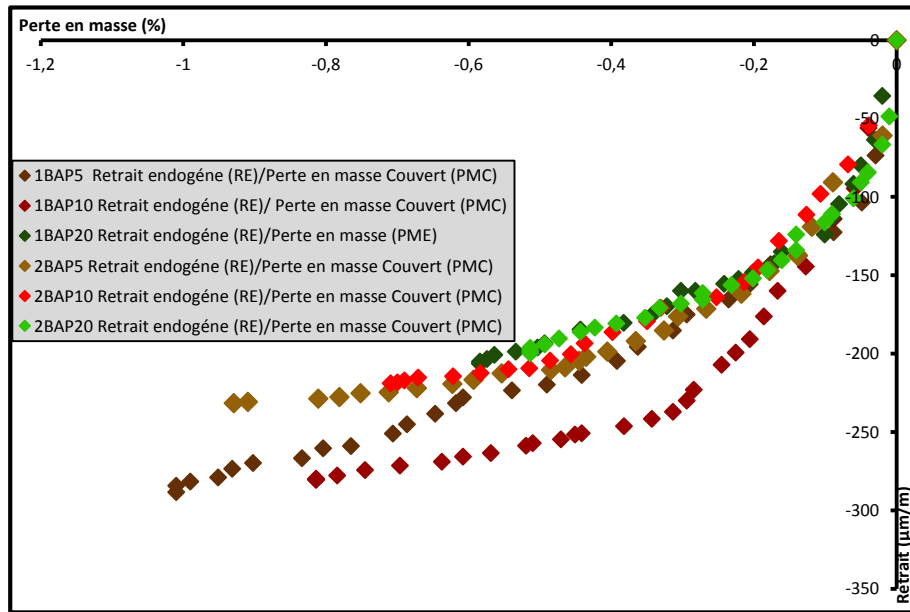


Figure II-2-49: Retrait en fonction de la perte de masse en mode des six bétons en mode couvert.

Le retrait évolue de manière quasi-linéaire avec la perte en masse pour les six bétons en mode Couvert.

c) Mode dessiccation:

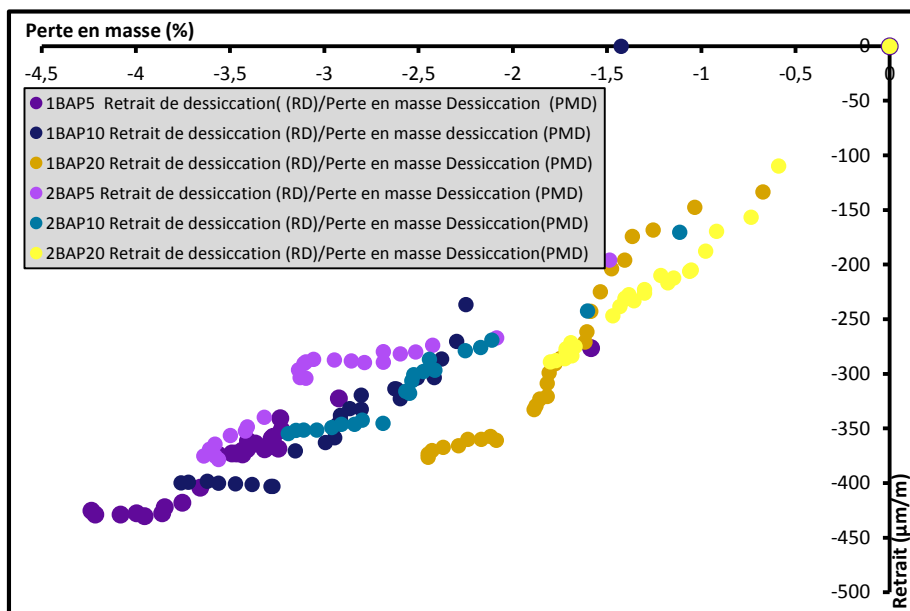


Figure II-2-50: Retrait en fonction de la perte de masse en mode des six bétons en mode dessiccation.

PARTIE II: ETUDE EXPERIMENTALE

II-2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les courbes du retrait de dessiccation en fonction de la perte en poids obtenues dans cette étude présentent deux phases :

-Lors de la première phase, la perte de masse n'engendre quasiment pas de retrait. Cette phase, courte dans le temps, est associée à l'évaporation de l'eau des pores les plus larges à la périphérie de l'éprouvette [Khelidj 98]. Granger [Turcry 04] montre au contraire qu'il y a une fissuration de la peau due au gradient d'humidité très intense entre la surface et le cœur du béton. Cette fissuration diminue considérablement l'amplitude du retrait mesurée.

-Lors de la deuxième phase, le retrait évolue linéairement avec la perte de masse.

d) Mode saturé :

Par contre dans le cas des éprouvettes conservées dans l'eau, nous avons constaté qu'il y a eu gain de masses depuis l'immersion des éprouvettes.

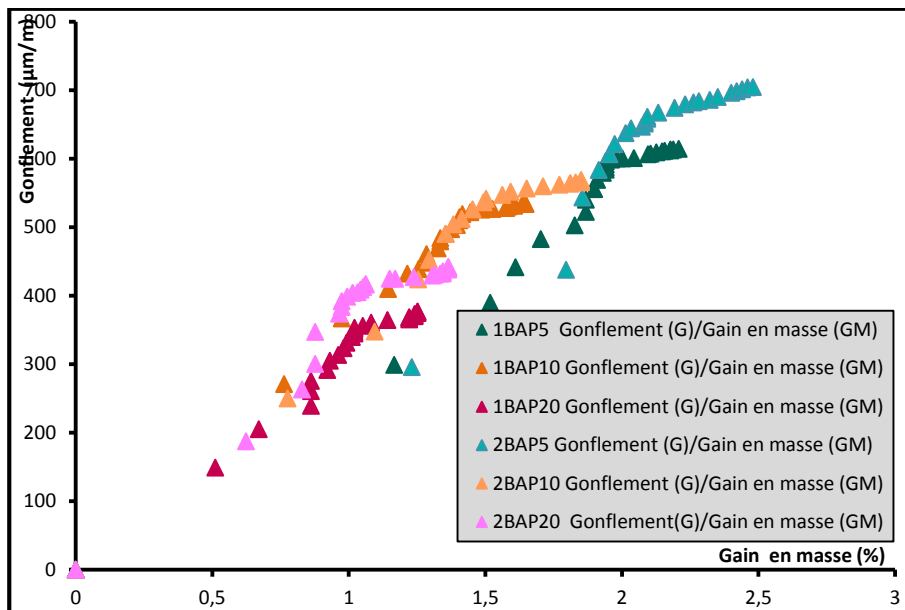


Figure II-2-51: Retrait en fonction de la perte de masse en mode des six bétons en mode saturé.

Le retrait évolue de manière quasi-linéaire avec la perte en masse pour les six bétons en mode Saturé.

Conclusion de la partie II:

Dans cette partie, nous avons mené à une étude expérimentale ou nous avons présenté une étude expérimentale des propriétés à l'état frais, durci et le comportement différé « retrait » des bétons autoplaçants. Six compositions différentes ont confectionnés en gardant le même squelette granulaire et le volume de pâte, et en faisant varier la finesse et la quantité de fillers calcaires. Les BAP se distinguent par deux rapports Filler/Liant (F/L) différents, trois (3) BAP avec un rapport filler/liant = 0.1 et trois (3) BAP avec un rapport filler /liant = 0.2 qui se différencient par la finesse de filler calcaire (UF5, UF10, F20).

A l'issue de cette partie nous pouvons tirer quelques conclusions :

- Six formulations préliminaires de bétons autoplaçants ont été gâchées et caractérisées à l'état frais. Ces bétons ont vérifié toutes les caractéristiques d'un béton autoplaçant à l'état frais préconisé par « AFGC ».
- Les résistances à la compression et à la traction par flexion sont inversement proportionnelles avec le taux de substitution du ciment par des fillers calcaire sur la plage testé [10%, 20%],
- La finesse favorise la contribution des additions calcaire vis-à-vis de la résistance en compression et à la traction par flexion,
- Le milieu de conservation influe d'une manière significative l'évolution des variations dimensionnelles et pondérales. Les éprouvettes couvertes (sans échange avec le milieu extérieur) présentent un retrait presque la moitié de celles conservées à l'air libre, cela est due à l'empêchement d'échange hydrique avec le milieu extérieur.
- Les BAP contenant plus de fillers calcaire présentent moins de retrait. Le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait des BAP, par contre ils présentent un plus de gonflement dans le mode saturé.
- Comme nous l'avons déjà mentionné dans la partie bibliographique :
 - ✚ le retrait endogène est la manifestation macroscopique de la contraction chimique qui a lieu lors de l'hydratation du ciment. Cette réaction, qui se poursuit tout au long de l'hydratation, est amenée à consommer l'eau contenue dans les capillaires. Ceci génère des tensions au sein du matériau qui sont d'autant plus fortes que les capillaires sont fins, autrement dit que la quantité d'élément fin est importante et la finesse de filler calcaire est grande.
 - ✚ Le retrait en dessiccation est lui lié à la migration de l'eau à l'intérieur du matériau qui est en déséquilibre hydrique avec le milieu extérieur. En revanche, lorsque le séchage continue, l'eau qui s'évapore est plus fortement liée (physiquement ou chimiquement) aux autres constituants de la matrice cimentaire (hydrates en particulier) et va donc générer une contraction du matériau.
- Les retraits mesurés sont légèrement supérieures à celles trouvées dans la littérature et cela est dû à l'utilisation des matériaux locaux.

PARTIE III :

APPROCHE REGLEMENTAIRE

CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES AMERICAINS ET EUROPEENS.

III-1-1 Introduction :

Le retrait du béton est essentiellement dû à l'évaporation de l'eau libre contenue dans le béton et par l'hydratation de ses constituants dans le temps. Au cours des dernières années, autant du côté américain que du côté européen, les ingénieurs se sont penchés sur les deux phénomènes qui conduisent au retrait total : le retrait endogène et le retrait de séchage. À partir de différentes mesures expérimentales, ils ont élaboré des modèles qui permettent de calculer le retrait à plus ou moins long terme. Ces modèles ont généralement été établis suivant une méthode quantitative consistant à comparer leurs prévisions avec des mesures de déformations d'éprouvettes de béton enregistrées durant des essais de retrait et de fluage en compression uniaxiale, et à calibrer ainsi les paramètres qu'ils prennent en compte [Espion, 1998].

Six modèles de prédiction du retrait du béton seront présentés : les trois modèles européens : Eurocode 2 et CEB- (Comité Euro-International du Béton-Fédération Internationale de la Précontrainte, version 90 et 99), et les trois modèles américains ACI 209 (American Concrete Institute) [ACI Commette 209, 1992], B3 [Bazant et Baweja, 1995] et GL2000 [Gardner et Lockman, 2001]. Le modèle ACI 209 est de loin le plus ancien de ces modèles mais il est toujours utilisé actuellement aux Etats-Unis. Des études comparatives des bases théoriques et physiques de certains de ces modèles sont proposées dans la littérature ([Bazant et Baweja, 1995], [Gardner et Lockman, 2001]).

Nous notons que seuls les modèles CEB-FIP et Eurocode 2 décomposent la déformation de retrait en une déformation de retrait endogène et une déformation de retrait de dessiccation. Nous pouvons aisément observer que ces décompositions des mécanismes physiques ne conduisent pas à une augmentation du nombre de paramètres requis. Dans cette partie nous allons comparer les différentes modèles européens entre eux et aussi les modèles américains.

III-1-2 Les modèles européens:

Les figures (III-1-1 jusqu'à III-1-24) présentent une comparaison entre les trois modèles européens :

- CEB MC 90,
- CEB MC 90-99,
- Eurocode 2.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES EUROPEENS ET AMERICAINS

III-1-2-1 Le béton 1BAP5:

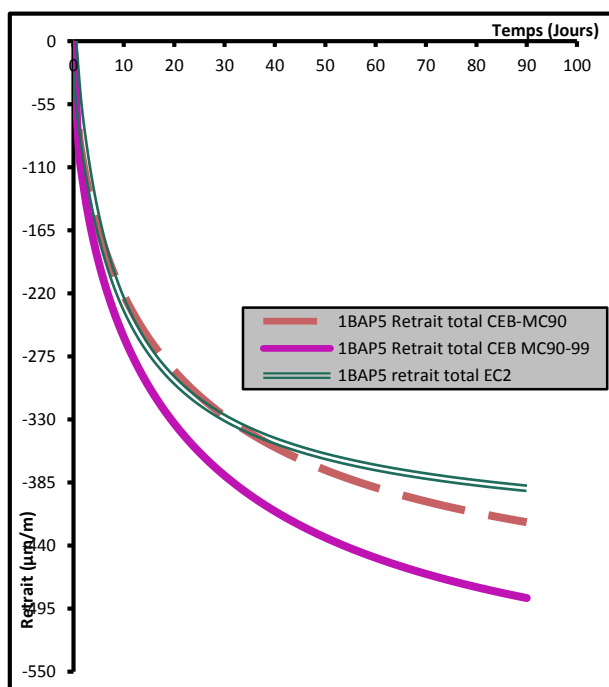


Figure III-1-1: Retrait total du 1BAP5 calculé par les modèles européens

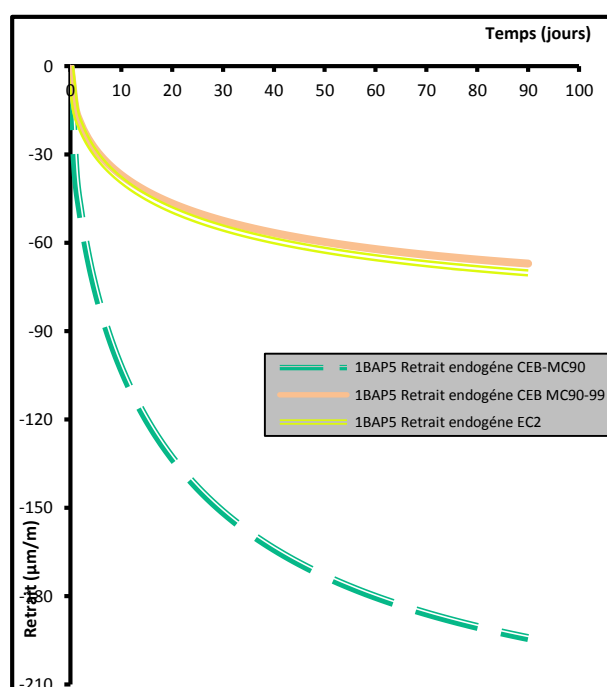


Figure III-1-2: Retrait endogène du 1BAP5 calculé par les modèles européens

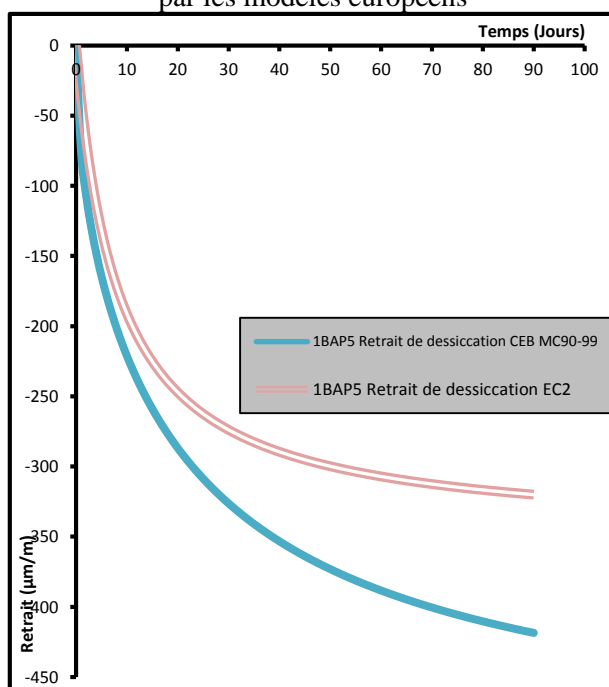


Figure III-1-3: Retrait de dessiccation du 1BAP5 calculé par les modèles européens

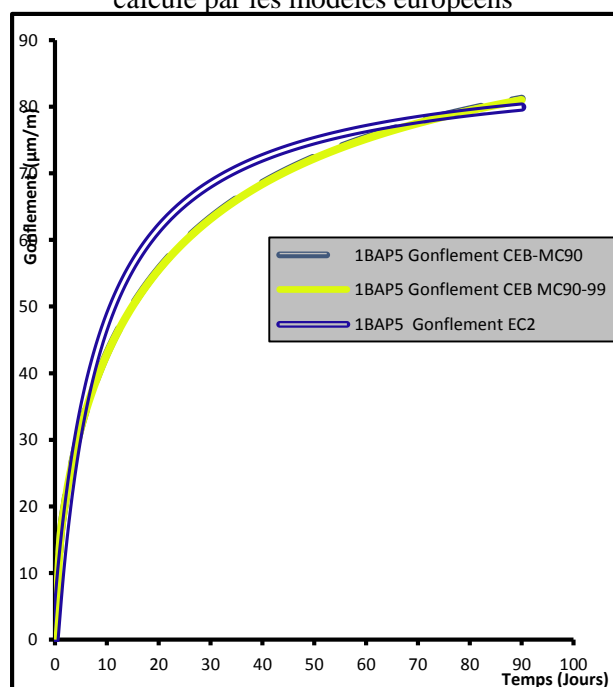
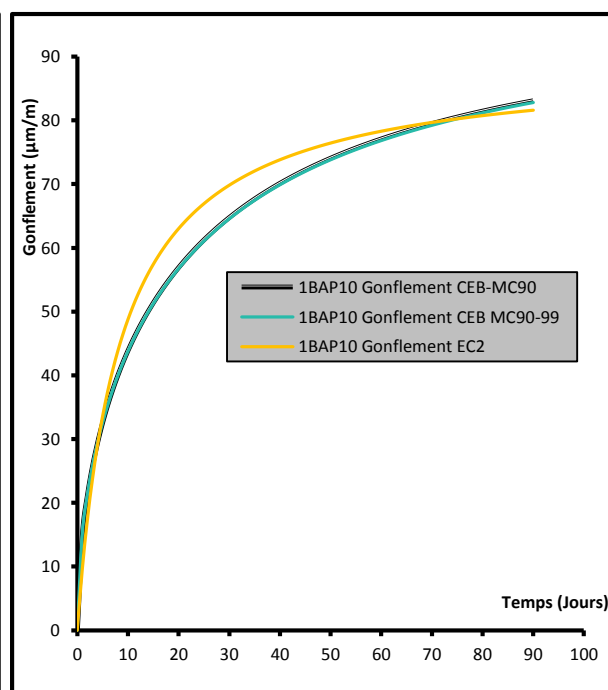
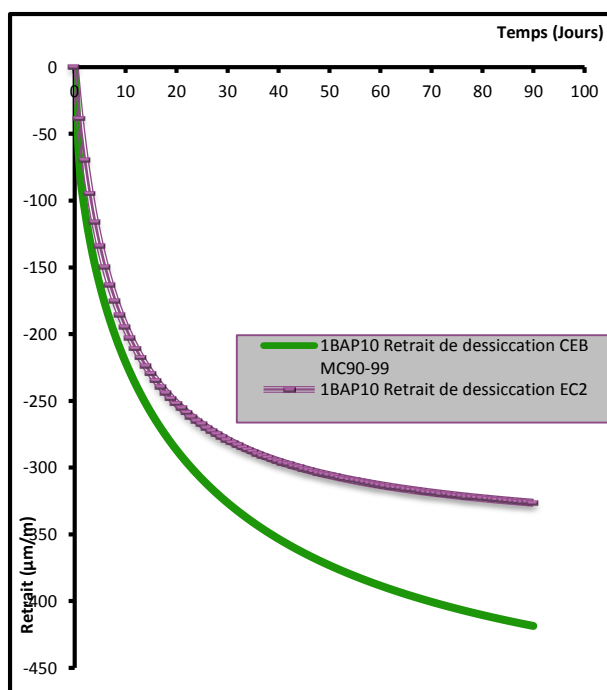
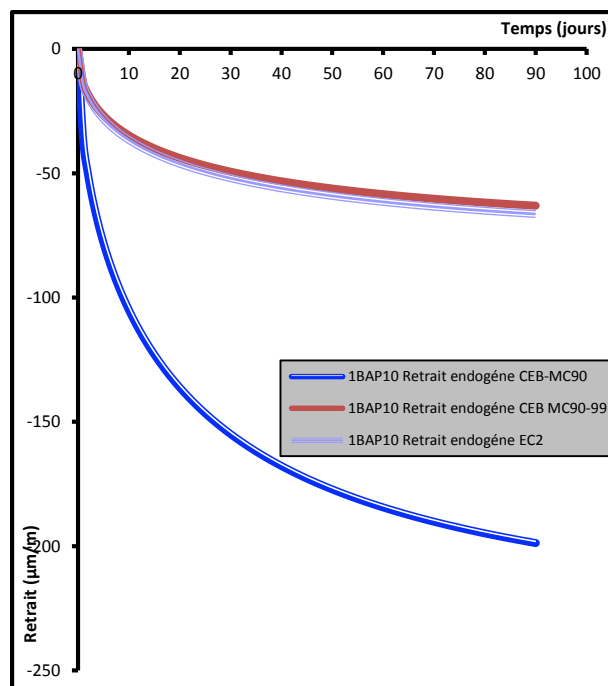
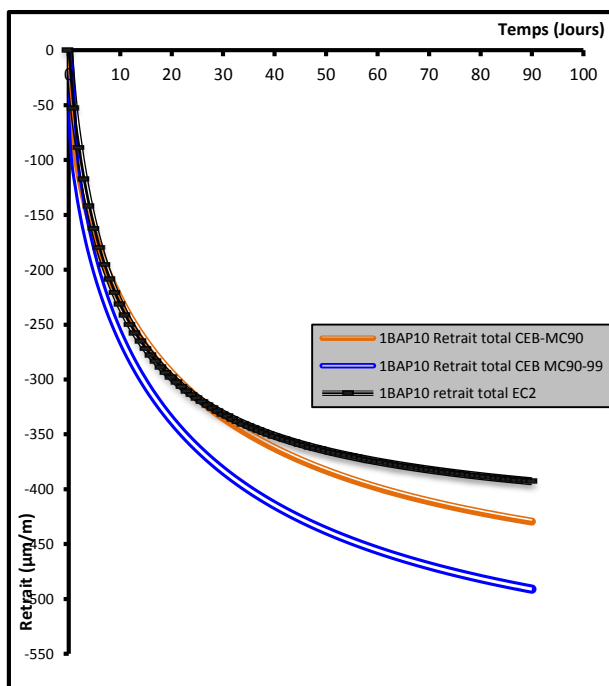


Figure III-1-4: Gonflement du 1BAP5 calculé par les modèles européens

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES EUROPEENS ET AMERICAINS

III-1-2-2 Le béton 1BAP10:



II-1-2-3 Le béton 1BAP20 :

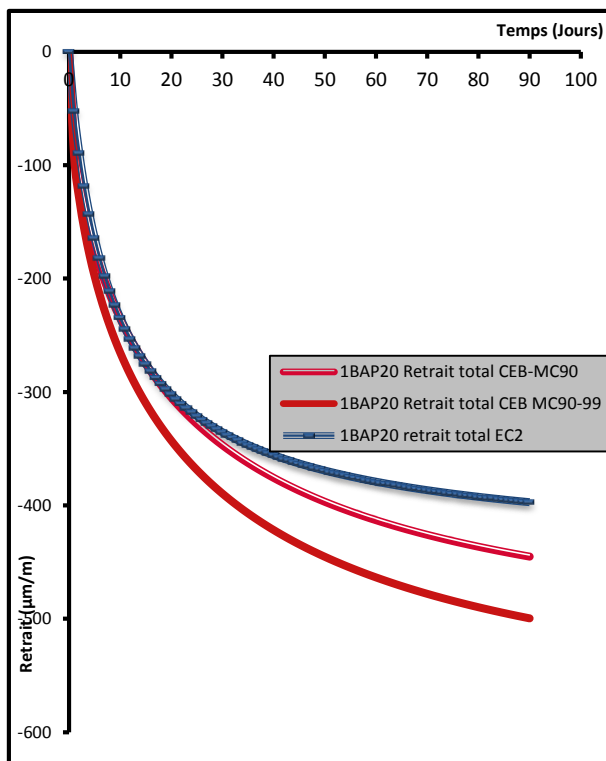


Figure III-1-9:Retrait total du 1BAP20 calculé par les modèles européens

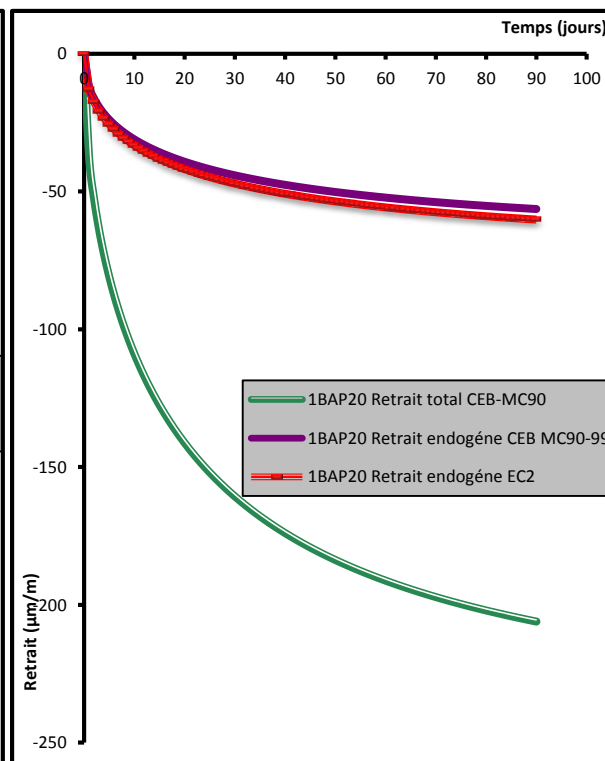


Figure III-1-10:Retrait endogène du 1BAP20 calculé par les modèles européens

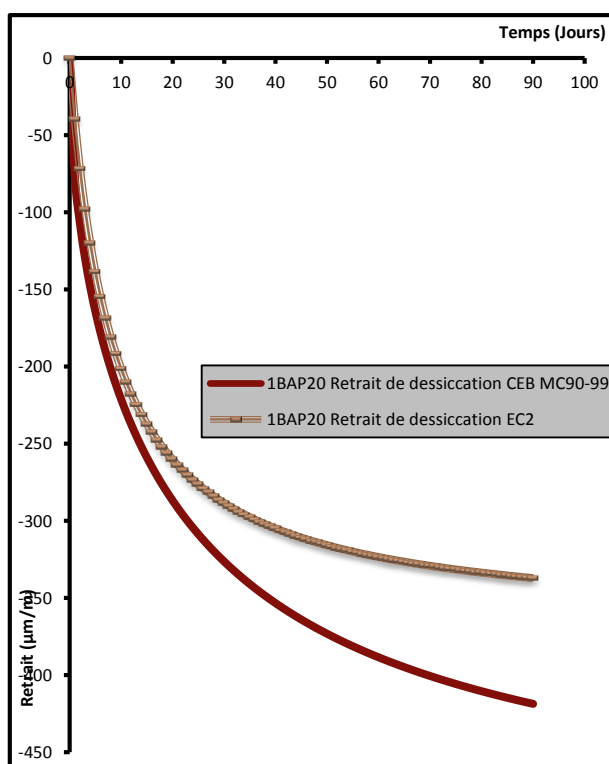


Figure III-1-11:Retrait de dessiccation du 1BAP20 calculé par les modèles européens

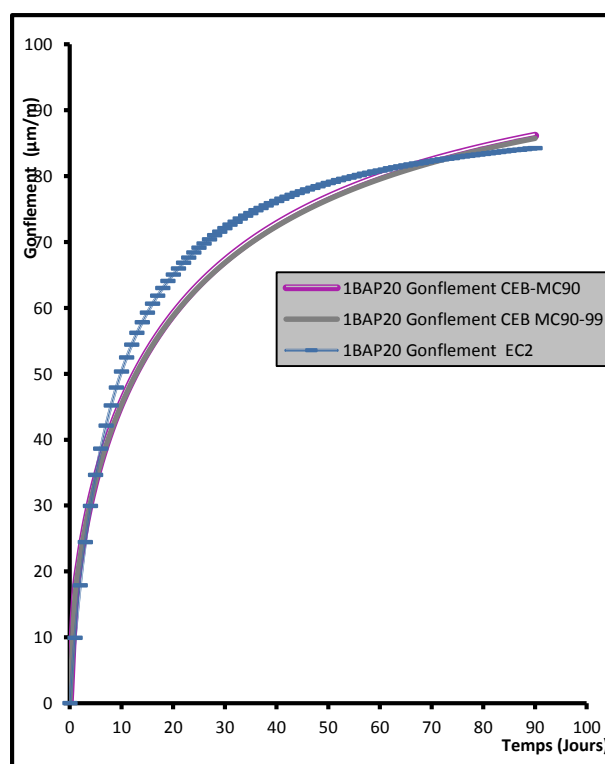


Figure III-1-12 Gonflement du 1BAP20 calculé par les modèles européens

II-1-2-4 Le béton 2BAP5:

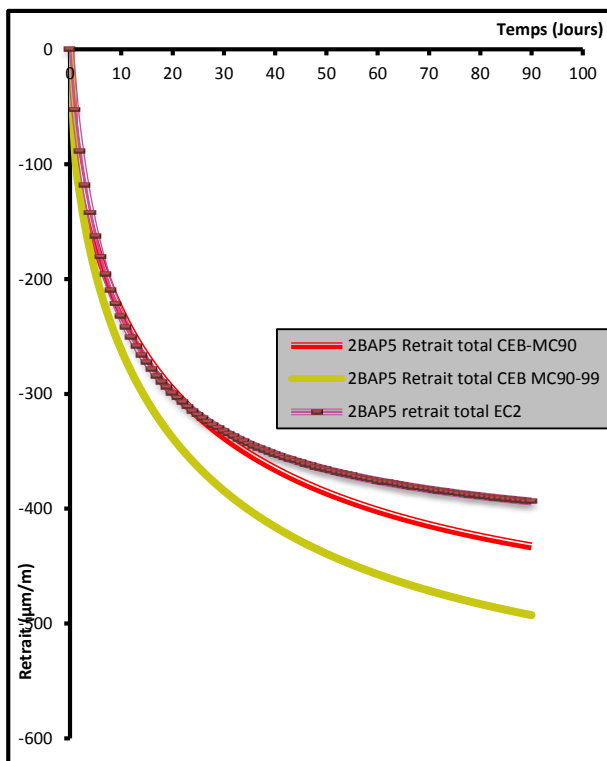


Figure III-1-13 Retrait total du 2BAP5 calculé par les modèles européens

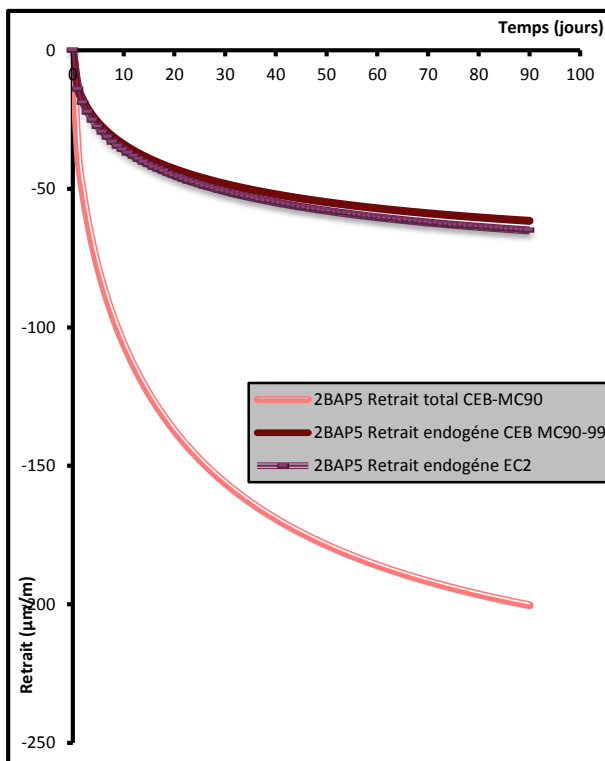


Figure III-1-14 Retrait endogène du 2BAP5 calculé par les modèles européens

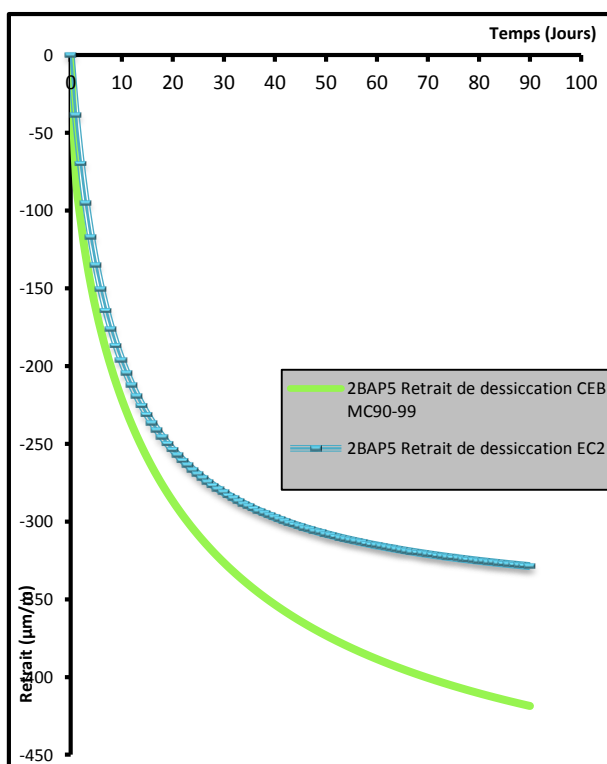


Figure III-1-15 Retrait de dessiccation du 2BAP5 calculé par les modèles européens

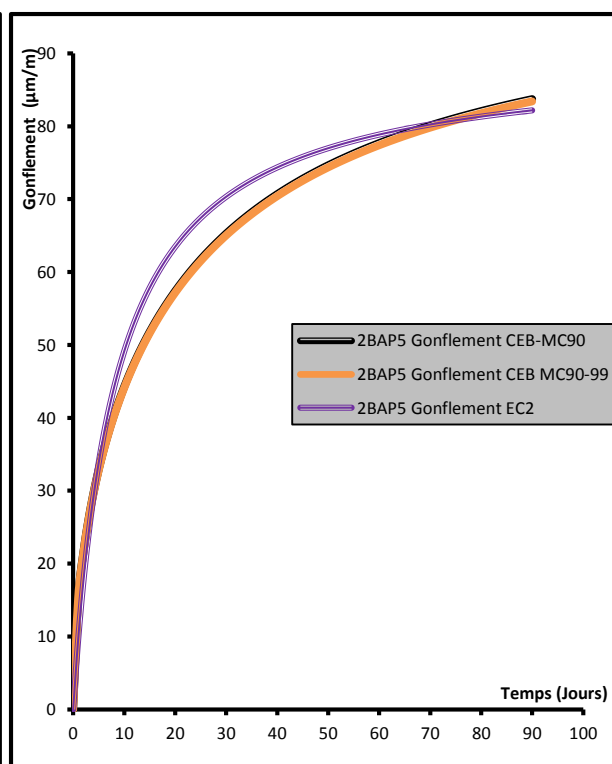


Figure III-1-16 Gonflement du 2BAP5 calculé par les modèles européens

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES EUROPEENS ET AMERICAINS

II-1-2-4 Le béton 2BAP10:

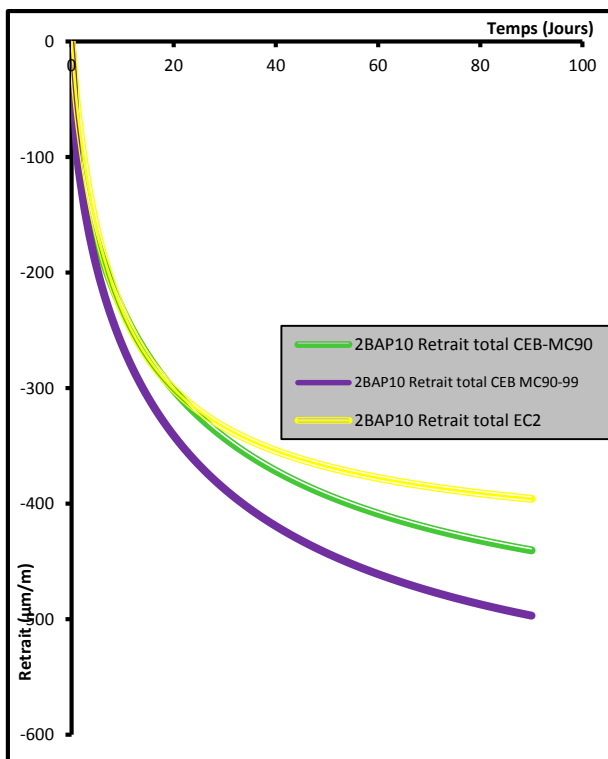


Figure III-1-17 Retrait total du 2BAP10 calculé par les modèles européens

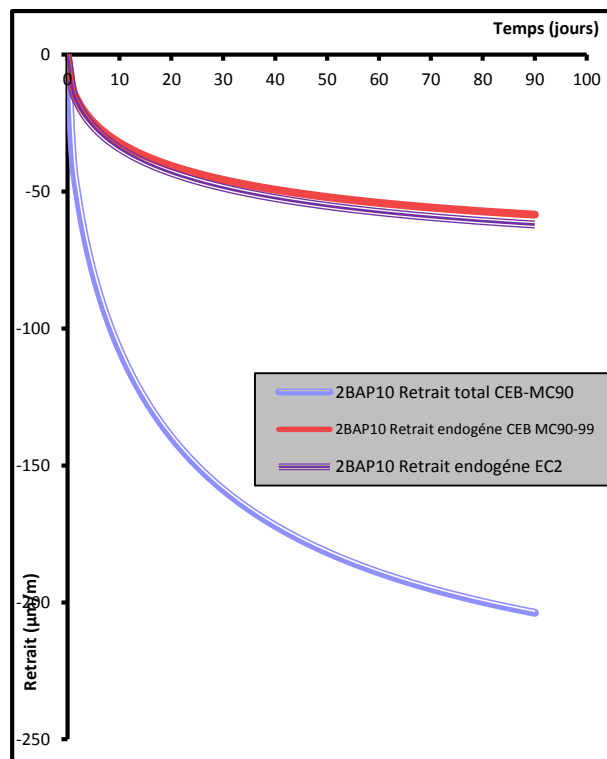


Figure III-1-18 Retrait endogène du 2BAP10 calculé par les modèles européens

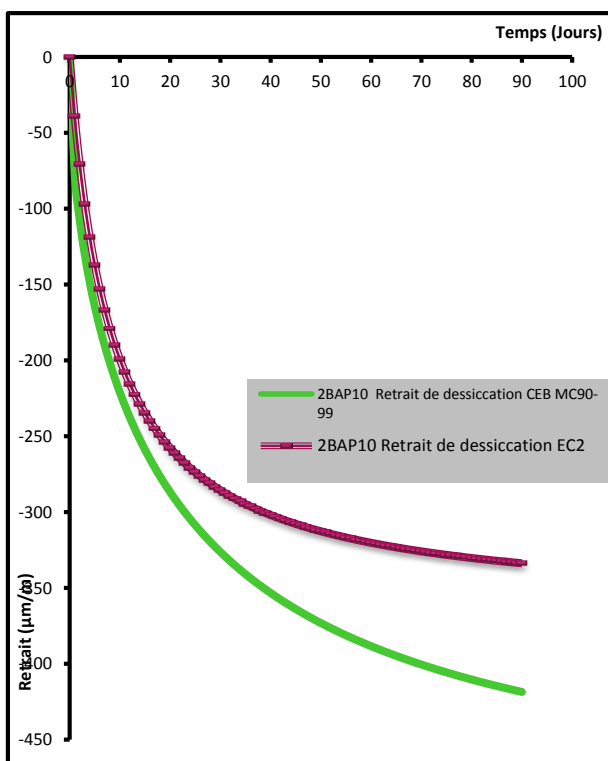


Figure III-1-19: Retrait de dessiccation du 2BAP10 calculé par les modèles européens

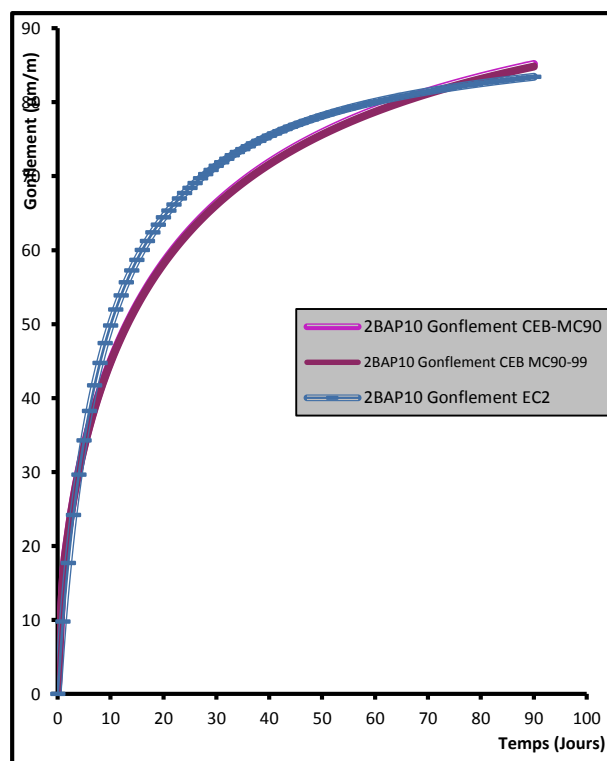
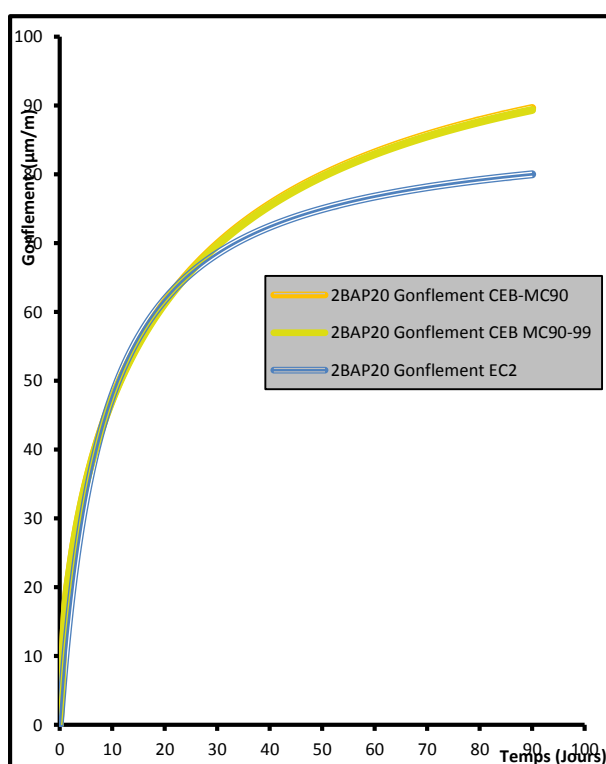
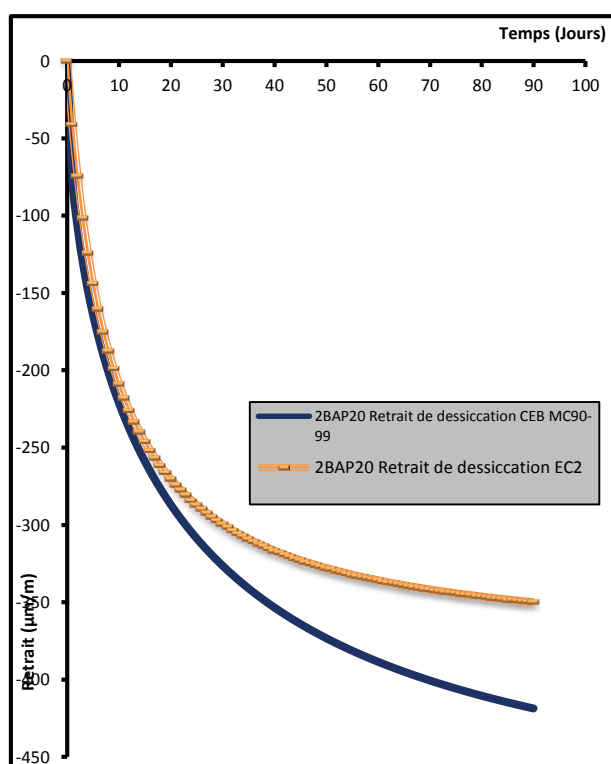
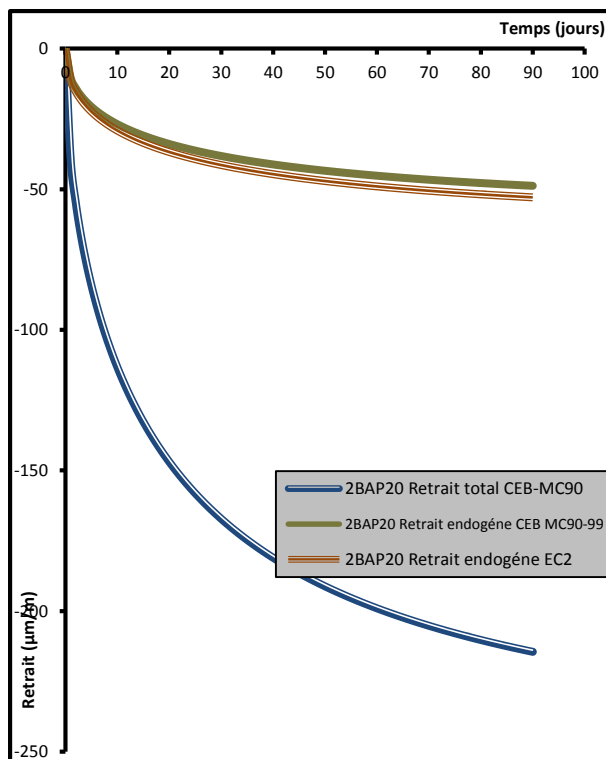
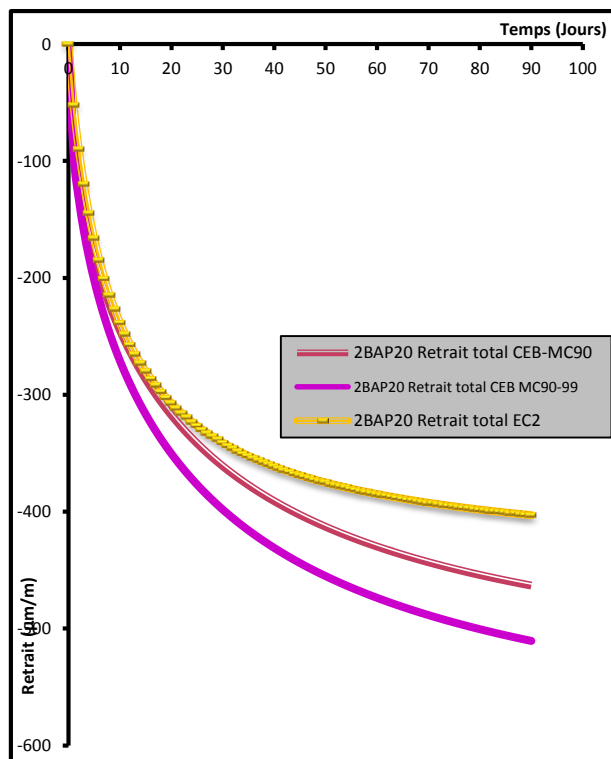


Figure III-1-20: Gonflement du 2BAP10 calculé par les modèles européens

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES EUROPEENS ET AMERICAINS

III-1-2-6 Le béton 2BAP20:



PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES EUROPEENS ET AMERICAINS

Nous constatons dans l'évaluation du retrait total des 6 BAP (Figure III-1-1, III-1-5, III-1-9, III-1-13, III-1-17, III-1-21) selon les modèles européens CEB MC 90, CEB MC 90-99 et Eurocode 2, que les deux modèles CEB MC 90 et Eurocode 2 sont superposés jusqu'au trentième jour, au delà de ce seuil, nous observons une différence de l'ordre de 20% qui est du essentiellement à la formule mathématique de chaque modèle et aux hypothèses du modèle.

CEB MC 90-99 et Eurocode 2 (les seuls modèles qui prisent en compte la décomposition du retrait total en un retrait endogène et un retrait de dessiccation) ont le même retrait endogène, les deux courbes sont parfaitement superposées (Figure III-1-2, III-1-6, III-1-10, III-1-14, III-1-18 et III-1-22) et ils présentent un retrait de dessiccation différent (Figure III-3, III-1-7, III-1-11, III-1-15, III-1-19 et III-1-23), cette dernière différence observée est la cause de l'écart observés pour retrait total.

Nous pouvons constater que les valeurs des trois types de retrait obtenues des trois modèles sont très différentes (sauf pour retrait endogène du CEB MC 90-99 et l'eurocode 2).

Concernant le gonflement (Figure III-1-4, III-1-8, III-1-12, III-1-16, III-1-20 et III-1-24) nous observons une variation presque similaire pour les trois modèles.

Tableau III-1-1 : Equations des modèles européens.

Modèles	Equations
CEB MC 90	$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \left[160 + 10\beta_{sc} \left(9 - \frac{f_{cm28}}{10} \right) \right] \times 10^{-6} x (-1,55) x \left[1 - \left(\frac{h}{h_0} \right)^3 \right] x \left[\frac{(t-t_c)/t_1}{350[(V/S)/(V/S)_0]^2 + (t-t_c)/t_1} \right]^{0,5}$
CEB MC 90-99	$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_c)$ $\varepsilon_{cas}(t) = -\alpha_{as} \left(\frac{f_{cm28}/f_{cm0}}{6 + f_{cm28}/f_{cm0}} \right)^{2,5} x 10^{-6} x \left(1 - e^{-0,2 \left(\frac{t}{t_1} \right)^{0,5}} \right)$ $\varepsilon_{cds}(t, t_c) = \left[(220 + 110\alpha_{ds1}) \exp \left(-\frac{\alpha_{ds2} f_{cm28}}{10} \right) \right] x 10^{-6} x (-1,55) x$ $\left[1 - \left(\frac{h}{h_0} \right)^3 \right] x \left[\frac{(t - t_c)/t_1}{350[(V/S)/(V/S)_0]^2 + (t - t_c)/t_1} \right]^{0,5}$
Eurocode 2	$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{ca} + \varepsilon_{cd}$ $\varepsilon_{ca}(t) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) x \{ 1 - \exp(-0,2 \cdot t \cdot 0,5) x 10^{-6} \}$ $\varepsilon_{cd}(t) = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{-\left(\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{10} \right)} \right] \cdot 10^{-6} x 1,55 x \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] x \frac{(t-t_s)}{(t-t_s) + 0,04\sqrt{h_0^3}} x K_h$

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES EUROPEENS ET AMERICAINS

D'après le tableau III-1-1, nous observons que les équations des divers modèles sont différentes.

II-1-3 LES MODELES AMERICAINS :

II-1-3-1 Le béton 1BAP5 :

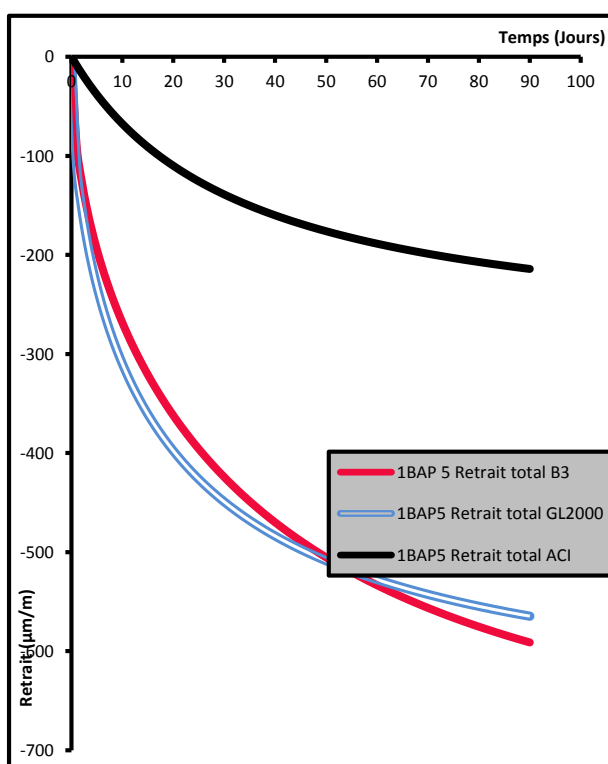


Figure III-1-25: Retrait total du 1BAP5 calculé par les modèles américains

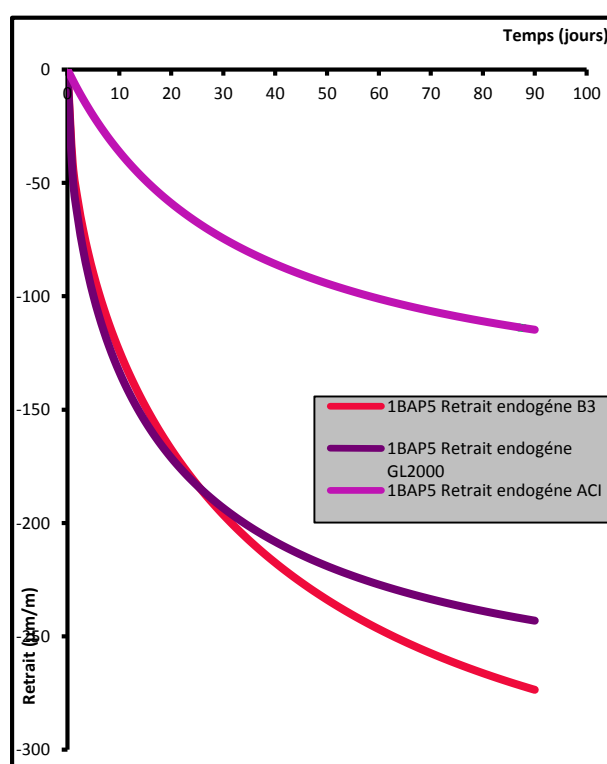


Figure III-1-26: Retrait endogène du 1BAP5 calculé par les modèles américains

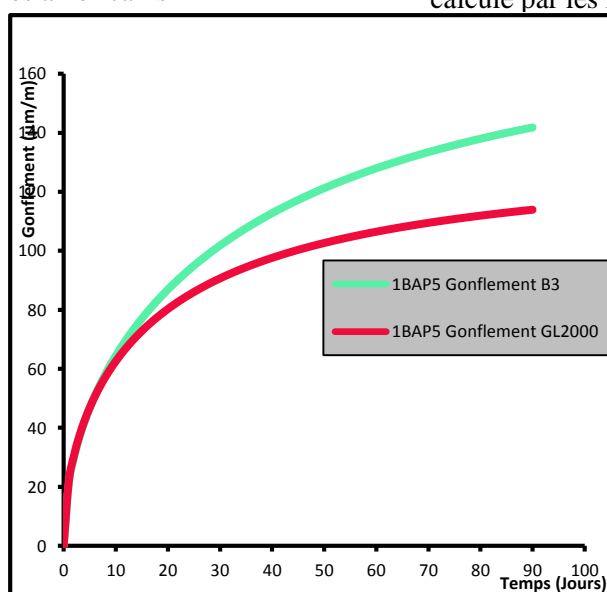


Figure III-1-27: Gonflement du 1BAP5 calculé par les modèles américains.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES EUROPEENS ET AMERICAINS

III-1-3-2 Le béton 1BAP10:

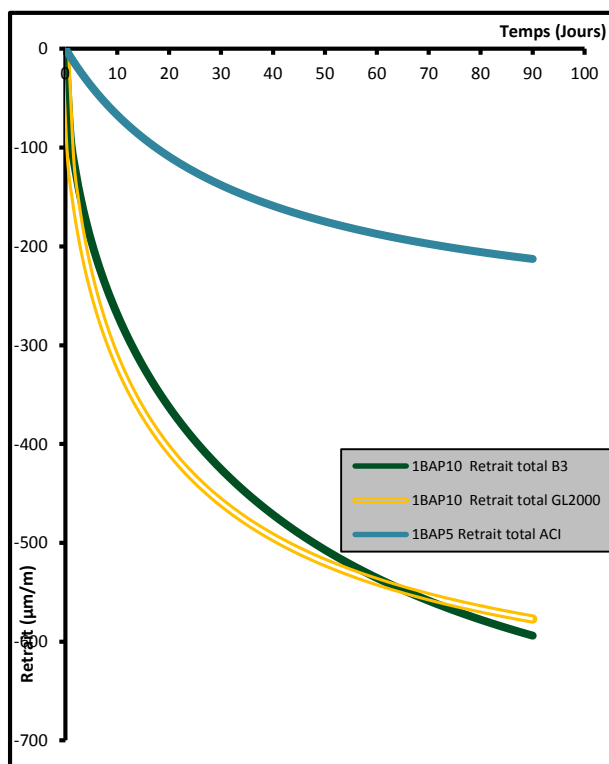


Figure III-1-28: Retrait total du 1BAP10 calculé par les modèles américains.

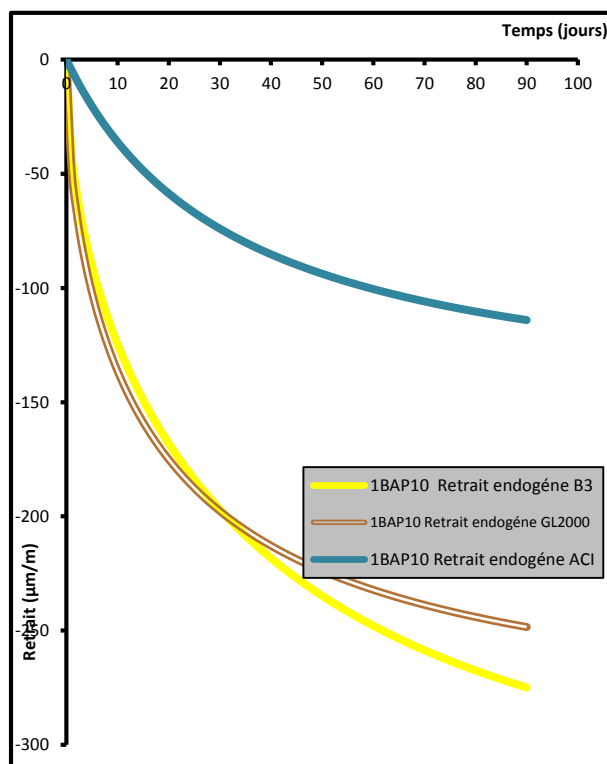


Figure III-1-29: Retrait endogène du 1BAP10 calculé par les modèles américains.

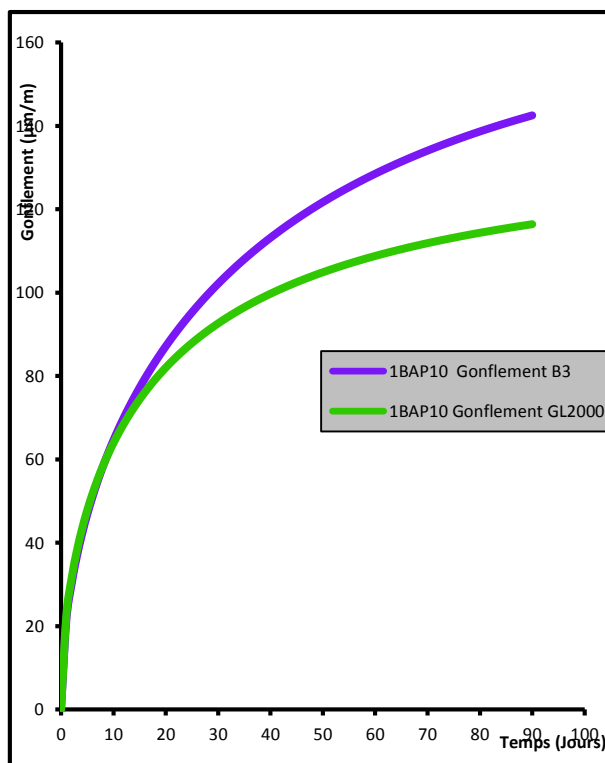


Figure III-1-30: Gonflement du 1BAP10 calculé par les modèles américains.

III-1-3-3 Le béton 1BAP20:

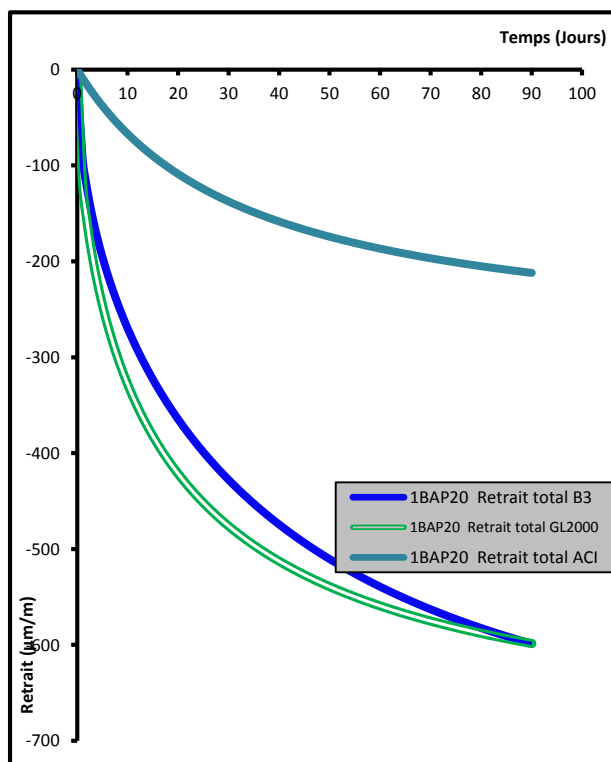


Figure III-1-31: Retrait total du 1BAP20 calculé par les modèles américains

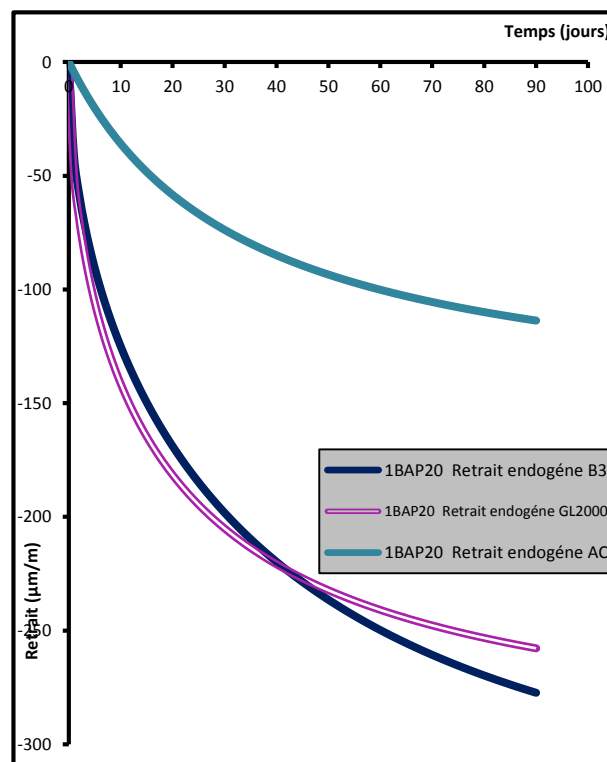


Figure III-1-32: Retrait endogène du 1BAP20 calculé par les modèles américains

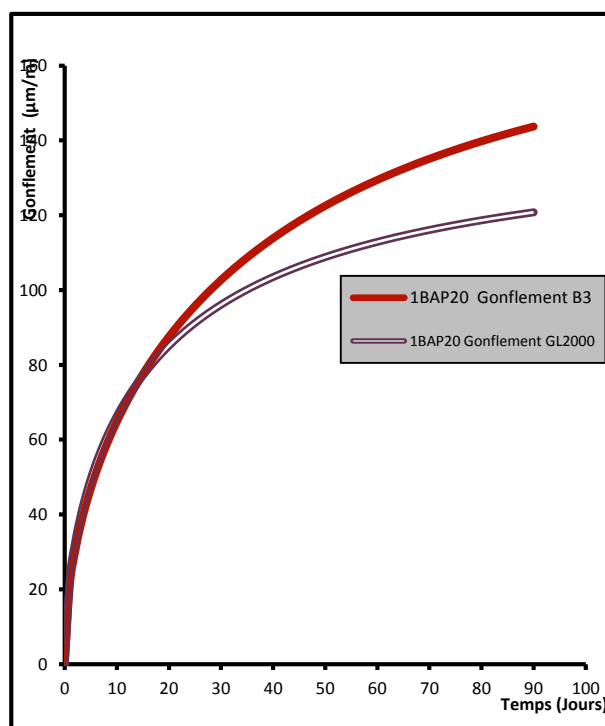


Figure III-1-33: Gonflement du 1BAP20 calculé par les modèles américains

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES EUROPEENS ET AMERICAINS

III-1-3-4 Le béton 2BAP5:

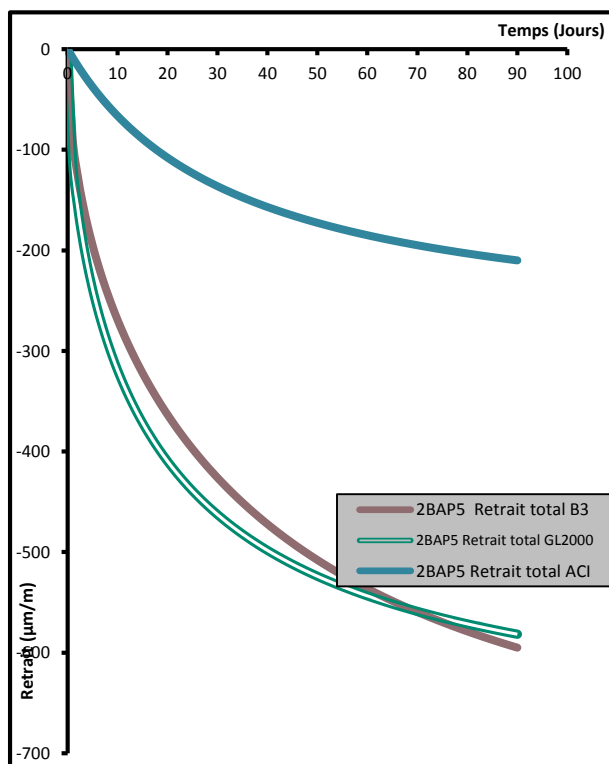


Figure III-1-34: Retrait total du 2BAP5 calculé par les modèles américains

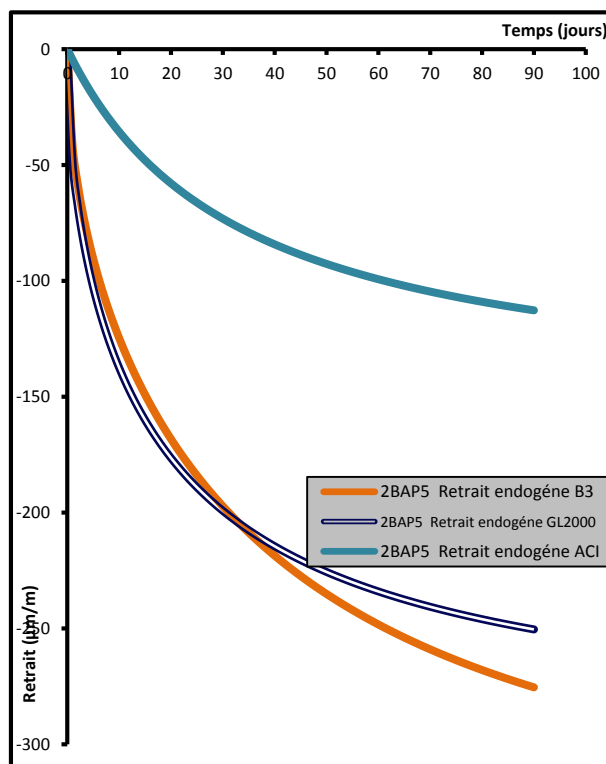


Figure III-1-35: Retrait endogène du 2BAP5 calculé par les modèles américains

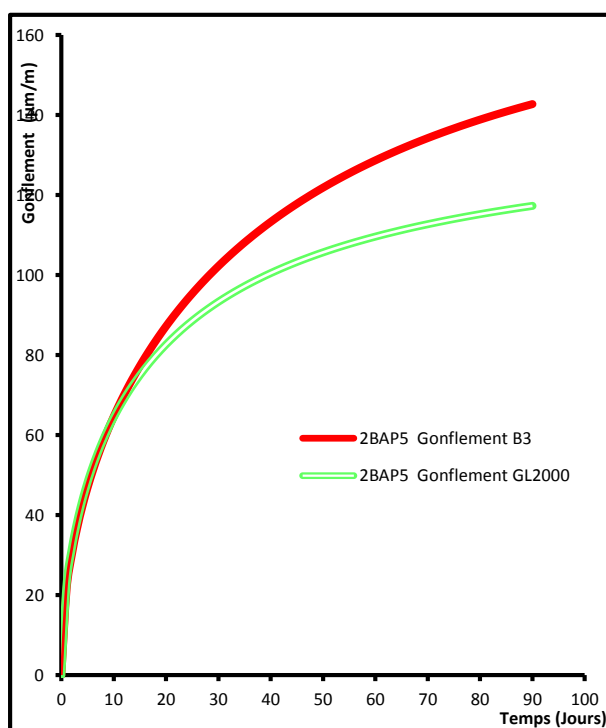


Figure III-1-36: Retrait endogène du 2BAP5 calculé par les modèles américains

III-1-3-5 Le 2BAP10 :

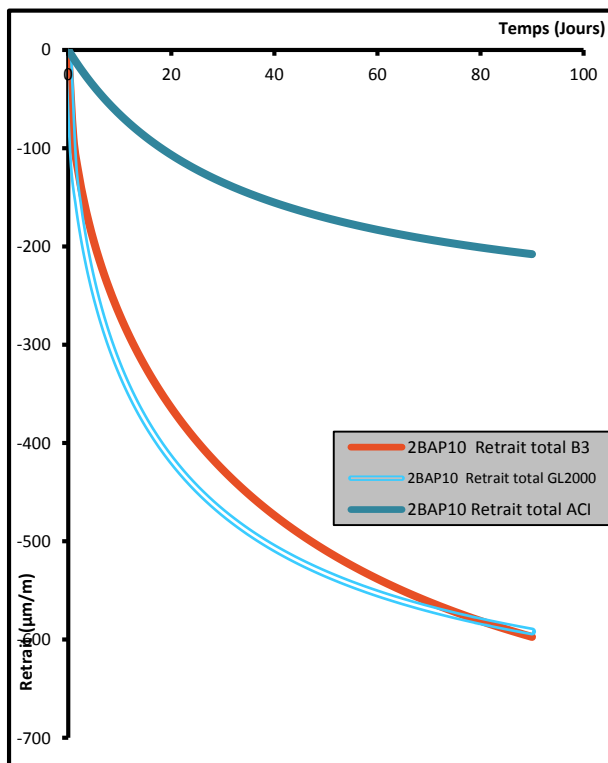


Figure III-1-37: Retrait total du 2BAP10 calculé par les modèles américains

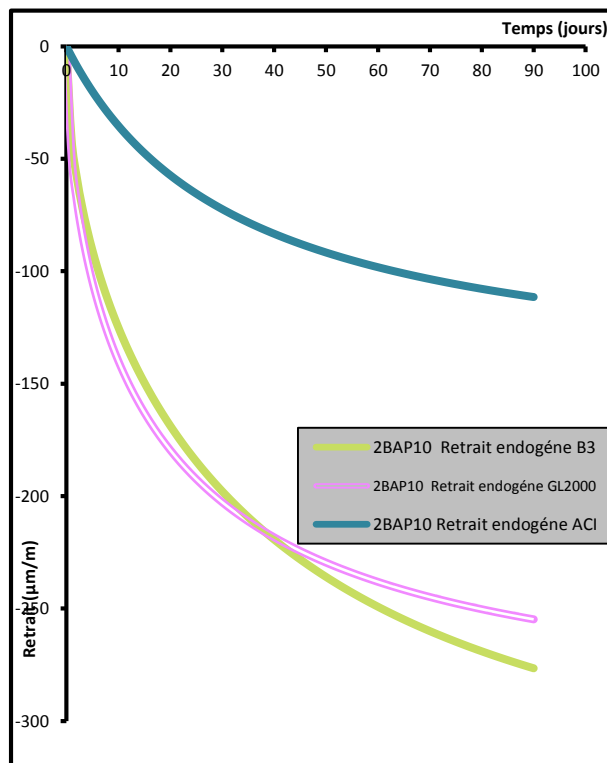


Figure III-1-38: Retrait endogène du 2BAP10 calculé par les modèles américains

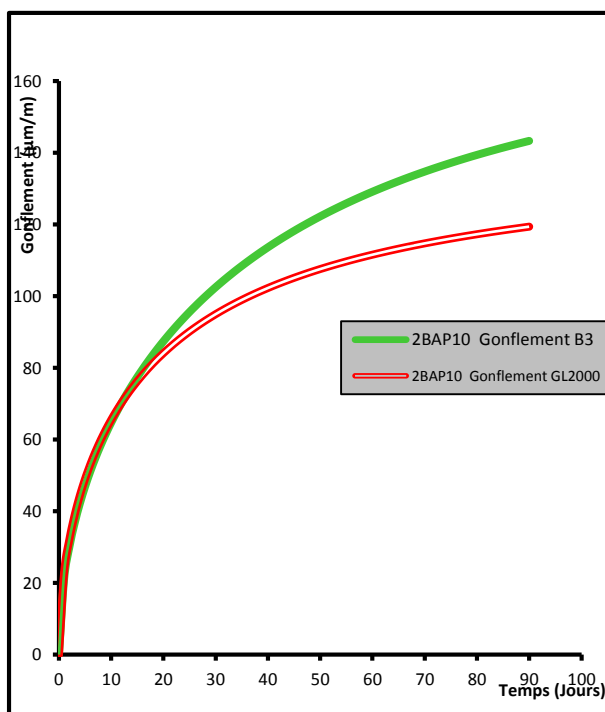


Figure III-1-39: Gonflement du 2BAP10 calculé par les modèles américains

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES EUROPEENS ET AMERICAINS

III-1-3-6 Le béton 2BAP20:

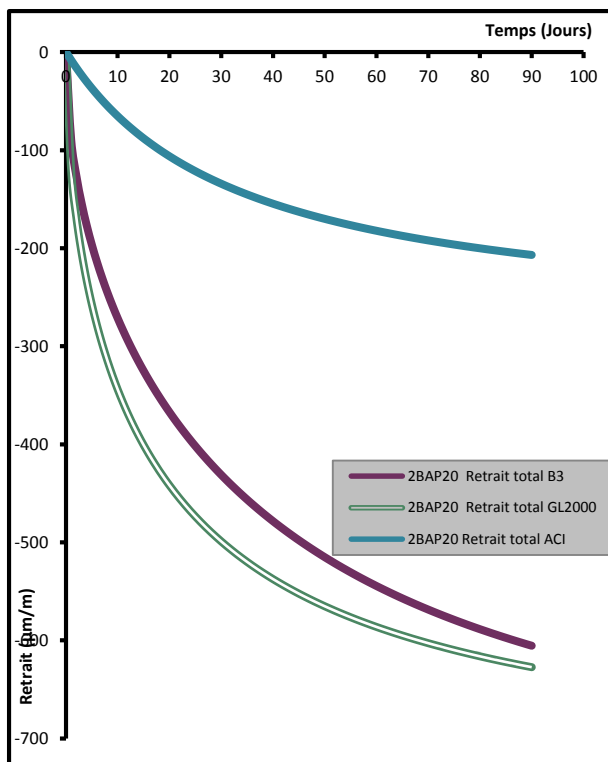


Figure III-1-40: Retrait total du 2BAP20 calculé par les modèles américains

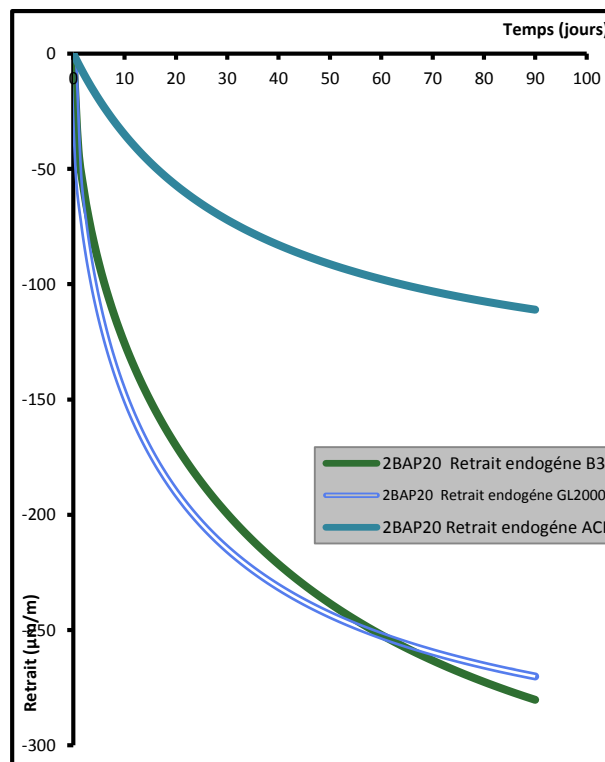


Figure III-1-41: Retrait endogène du 2BAP20 calculé par les modèles américains

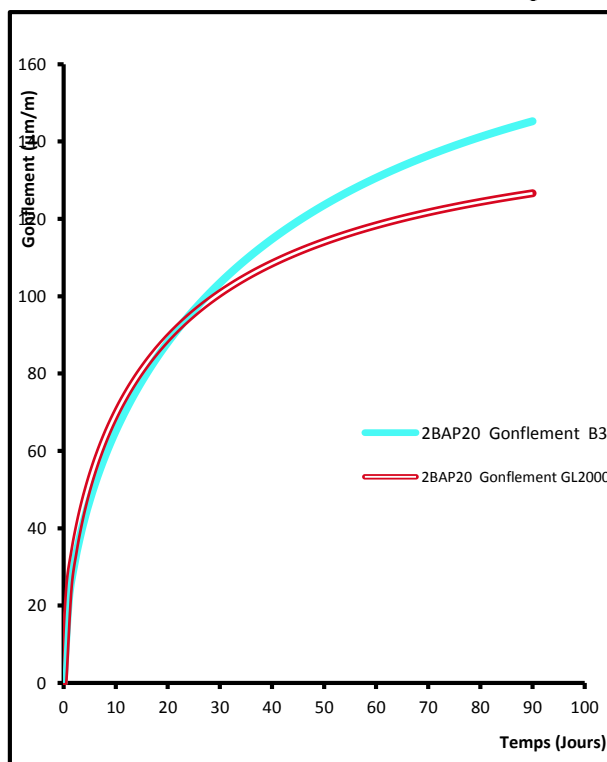


Figure III-1-42: Gonflement calculé par les modèles américains

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES EUROPEENS ET AMERICAINS

Les Figures (III-1-25 jusqu'au III-1-42) représentent des résultats issus des modèles réglementaires américains ACI, B3, GL2000. Ces figures montrent que les deux derniers modèles sont assez comparables alors que le modèle ACI est très éloignée et cela pour retrait total et endogène.

Les modèles américains, contrairement aux modèles européens tiennent en compte uniquement du retrait total et endogène, le modèle ACI ne prend pas en compte le gonflement dans ses calculs.

Pour le retrait total nous observons un point qui inverse l'évolution du retrait des modèles B3 et GL2000 qui est généralement entre 50 et 60 jours.

Le modèle ACI a basé son approche pour l'établissement du modèle en négligeant le paramètre de la résistance mécanique à 28 jours qui s'avère un paramètre essentiel pour la détermination du retrait, les autres paramètres retenus sont complètement différents des deux autres modèles (dosage en ciment, granulométrie, affaissement, la teneur en air), ces paramètres sont représentatif de la composition du béton et qui ne sont pas prisent par les autres modèles.

Le modèle B3 est compliqué, il demande un nombre de paramètre très important par contre le GL2000 est très simple dans sa formule et finalement les deux modèles donnent des valeurs convergents.

Tableau III-1-2 : les équations des modèles américains.

Modèles	Equations
ACI	$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{(t-t_c)}{26,0 e^{(1,42 \times 10^{-2} (V/S)) + (t-t_c)}} \gamma_{sh,tc} \cdot \gamma_{sh,RH} \cdot \gamma_{sh,vs} \cdot \gamma_{sh,s} \cdot \gamma_{sh,\psi} \cdot \gamma_{sh,c} \cdot \gamma_{sh,\alpha} \cdot 780 \cdot 10^{-6}$
B3	$\varepsilon_{sh}(t) = -\alpha_1 \alpha_2 [1,9 \times 10^{-2} W^{2,1} (f_c) - f_c^{-0,28} + 270] \cdot 10^{-6} \cdot \frac{E(7+600)}{E(t_0 + \tau_{sh})} \cdot \tanh\left(\frac{t-t_0}{\tau_{sh}}\right) \cdot 0,5$
GL2000	$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = 1000 \cdot k \cdot \left(\frac{30}{f_{cm28}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 1,18 RH^4) \cdot \left(\frac{t-t_c}{t-t_c + 0,15 \left(\frac{V}{S}\right)^2}\right)^{0,5}$

Aucune relation entre les équations n'est remarquée.

Bilan des modèles :

Une analyse comparative des différents modèles réglementaires développés pour décrire le retrait du béton a été réalisée dans cette partie.

Le tableau (III-1-3) synthétise les limites établies pour un ensemble de paramètres. Il faut souligner que l'absence de limite n'implique pas qu'il n'en n'existe pas.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES EUROPEENS ET AMERICAINS

Tableau III-1-3: Domaines de validité annoncés des six modèles de prédiction étudiés

Paramètres	CEB-FIP 90	CEB-FIP 99	EC2	B3	ACI 209	GL2000
Résistance en compression (MPa)	[12,80]	[12-120]	[20-90]	[17,70]	/	[16 - 82]
Humidité relative ambiante (%)	[40-100]	[40-100]	[40-100]	[40-100]	[40-100]	[20-100]
Rapport massique (eau/ciment)	/	/	/	[0,35-0,85]	/	[0,4 - 0,6]
Rapport massique (granulat/ciment)	/	/	/	[2,5-13,5]	/	/
Contenu en ciment (kg/m ³)	/	/	/	[160-720]	/	/
Température (°C)	[5-30]	[5-30]	[0-80]	/	/	[15-30]
Durée de la cure humide (jours)	≤ 14 jours	≤14 jours	/	≥1 jour	≥1 jour	≥1 jour
Durée de la cure par vapeur (jours)	/	/	/	/	1 à 3jours	/
L'âge du béton au début de séchage t ₀	≥1 jour	≥1 jour	≥0,5 jour	t ₀ ≥ t _c	≥7 jours	t ₀ ≥ t _c ≥1 jour
Type de ciment	R,SL,RS I , II , III	R,SL,RS I , II , III	R,SL,RS I , II , III	R,SL,RS I , II , III	R , RS I , III	R,SL,RS I , II , III

A titre de comparaison, les paramètres qui sont utilisés pour calculer la déformation de retrait pour le modèle ACI sont : mode et durée de cure, rapport volume/surface exprimé par V/S, la teneur et le type de ciment, le pourcentage de granulat fin en poids, pourcentage d'air, et l'affaissement et l'humidité relative, les paramètres de composition sont pris uniquement par ce modèle.

En termes de conditions environnementales, les différents modèles intègrent les mêmes paramètres, en dehors du type de cure considéré par les seuls modèles ACI et B3. Bien que tous les modèles fassent intervenir un facteur de dimensions géométriques traduisant l'effet d'échelle, il est à noter que celui-ci est défini différemment selon les codes : « V/S pour B3, GL 2000, CEB MC 90 et CEB MC 90-99 et par $h=2A_c/U$ pour l'Eurocode 2, la forme de l'échantillon est prise par le seul modèle B3.

Le B3 prend beaucoup de paramètres qui sont la teneur en eau, type de ciment, F_{c28} , module d'élasticité, l'humidité relative, la taille et la forme de l'échantillon, mode de cure mais le modèle GL 2000 est le plus simple avec un nombre minimal de paramètres : F_{c28} , humidité relative, type de ciment et le rapport V/S. Les modèles B3 et GL2000 donnent des déformations presque identiques avec une variation de 4%.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES EUROPEENS ET AMERICAINS

A partir des différentes investigations, les paramètres pris en compte de chaque modèle sont donnés dans le tableau suivant :

Facteurs pris en compte pour les différents modèles		Modèle européens			Modèles américains		
		CEB-90	CEB-99	EUROCODE 2	B3	GI2000	ACI 209
<i>Composition des bétons</i>	Date d'origine	1990	1999	2005	1995	2000	
	Le rapport (Agrégat/ciment)	non	non	non	oui	non	non
	Dosage en ciment	non	non	non	non	non	non
	Type de ciment	oui	oui	oui	oui	oui	oui
	le rapport (eau/ciment)	non	non	non	non	non	non
	la teneur en eau	non	non	non	oui	non	non
	Forme de la section	oui	oui	oui	oui	oui	oui
	la résistance en compression	oui	oui	oui	oui	oui	non
<i>Conditions d'environnement</i>	Humidité Relative	oui	oui	oui	oui	oui	oui
	La température (T°)	oui	non	non	non	non	non
	Conditions de cure	non	non	non	oui	oui	non
	Durée de la cure	non	non	oui	oui	oui	non
	L'âge du béton début de séchage	oui	oui	oui	oui	oui	oui

La description précédente des différents modèles codifiés met en évidence que seuls les modèles CEB MC 90-99 et Eurocode 2 décomposent la déformation de retrait en une déformation de retrait endogène et une déformation de retrait de dessiccation. On peut aisément observer dans le Tableau III- que ces décompositions des mécanismes physiques ne conduisent pas à une augmentation du nombre de paramètres requis.

La comparaison des modèles américains avec les modèles européens du 1BAP5 pour retrait total, endogène, dessiccation et gonflement sur les figures (III-1-43 jusqu'au III-1-46)

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES EUROPEENS ET AMERICAINS

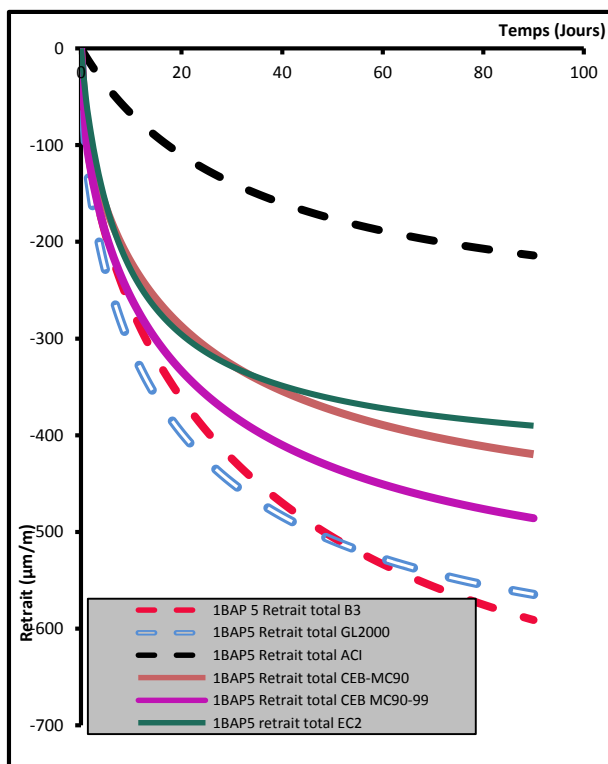


Figure III-1-43 : Retrait total calculé par les modèles européens et américains du béton

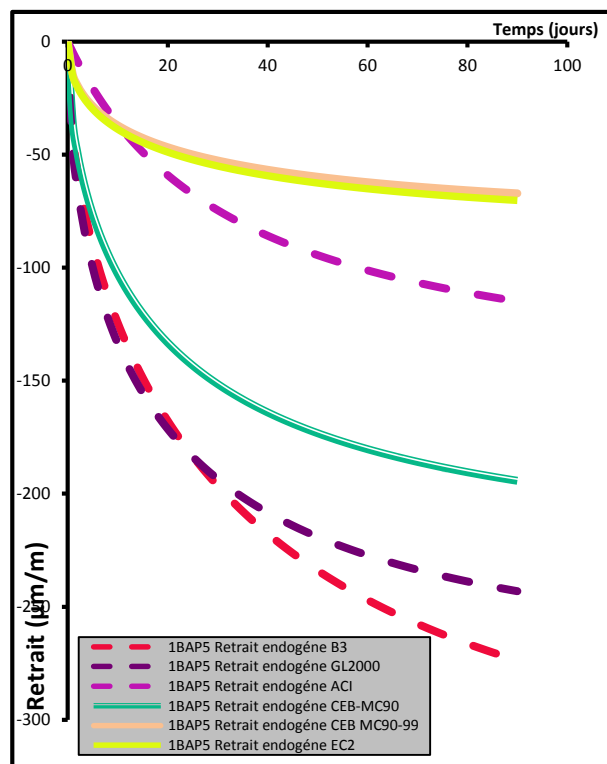


Figure III-1-44 : Retrait endogène calculé par les modèles européens et américains du béton 1BAP5

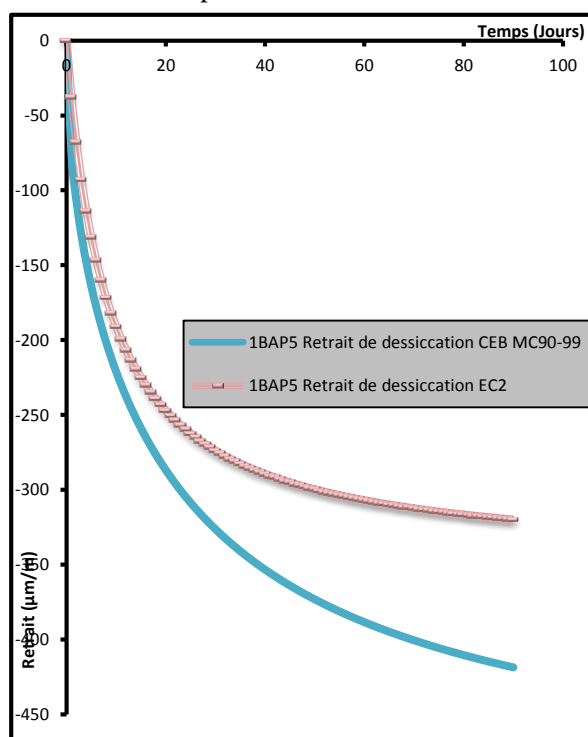


Figure III-1-45 : Retrait endogène calculé par les modèles européens du béton 1BAP5

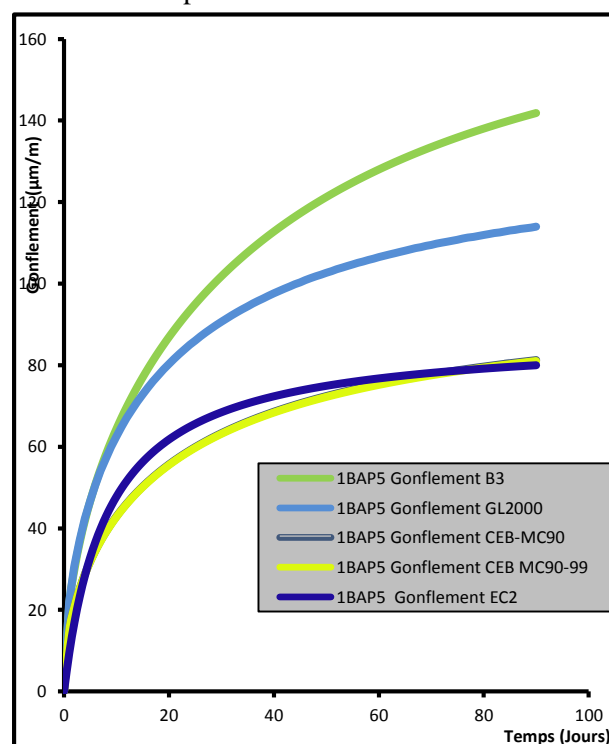


Figure III-1-46 : Gonflement calculé par les modèles européens et américains du béton 1BAP5

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-1 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES MODELES EUROPEENS ET AMERICAINS

L'analyse entre les déformations des modèles américains et les modèles européens, montre que ces derniers sous estime les déformations du retrait.

Les résultats de la mesure de retrait sont comparés pour chaque béton avec les valeurs prédites de deux modèles américains (GL2000 et B3) et d'autre part, avec deux modèles européens (Eurocode 2 et CEB MC90-99) et qui vont être confrontées aux résultats expérimentaux dans la partie suivante.

CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRE
AVEC LES RESULTATS EXPERIMENTAUX

III-2-1 Introduction :

La prédiction de la déformation de retrait est un aspect important dans l'évaluation du comportement à long terme du béton. Dans cette étude, les résultats expérimentaux de retrait du béton autoplaçant sont confrontés avec des modèles prédictifs, ces modèles mettent l'accent sur la prévision du comportement du béton jusqu'à une période de 90 jours. Le critère de comparaison choisi étant la résistance mécanique à la compression à 28 jours qui variant entre 30 et 45 MPa et l'humidité relative qui varie entre 50 et 90%.

Il demeure difficile pour un ingénieur concepteur de choisir entre ces différents modèles. Cette difficulté est liée au fait que ces modèles sont basés sur une décomposition différente des déformations, et qu'ils demandent un nombre et des types de paramètres décrivant les propriétés physiques et mécaniques du matériau variées. Nous n'avons pas pris en compte tous les modèles réglementaires de prévisions de déformations différées cités dans la partie bibliographique. Nous n'avons retenu que les modèles les plus performants et les plus courants selon la RILEM.

La question de la mesure des performances d'un modèle de prévision des déformations différées du béton est donc complexe et n'a reçu qu'une réponse partielle, car il n'existe pas aujourd'hui de méthodologie unanimement acceptée. Jusqu'à présent, la seule méthode utilisée a été la comparaison des prévisions des modèles avec des mesures de déformations réalisées sur des éprouvettes soumises en laboratoire à des essais de retrait et de fluage en compression. La base de donnée de la RILEM (Espion 1998, Bengougam 2002) a rassemblé une majorité de ces résultats expérimentaux.

Dans ce chapitre, nous avons reporté sur les Figures (III-2-1 jusqu'à II-2-24), l'évolution des différents types de retraits, retrait total, endogène, dessiccation, gonflement calculés par deux modèles européens : Eurocode 2, CEB-FIP 99 et deux modèles américains : B3 et GL2000 et de celles déterminées expérimentalement (résultats issus de notre étude expérimentale sur le retrait).

A partir des résultats expérimentaux cités ci-dessous, nous avons cherché le modèle de prévision le mieux adapté au phénomène étudié, Parmi les modèles cités, le modèle américain, B3 s'avère le mieux adapté pour décrire le phénomène étudié, c'est à dire l'évolution du retrait en trois modes en fonction du temps. Les autres modèles présentent certains inconvénients.

III-2-2 Confrontation des résultats expérimentaux avec les modèles prédictifs :

Les figures (III-1-1 jusqu'à III-1-24) montrent les déformations de retrait des mélanges de béton calculés à différents modes de conservation, retrait total (HR=50±5%), retrait endogène (HR=80±5%) et gonflement.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

Lorsque l'humidité relative de l'environnement entourant le béton augmente, le rétrécissement diminue parce l'écart d'humidité entre le béton et l'environnement a diminué.

Les règlements ne donnent pas de valeurs de gonflement pour les bétons immergés dans l'eau mais seulement pour celles conservés à une humidité de 100%.

III-2-2-1 Le retrait total :

Les figures (III-2-1), (III-2-2), (III-2-3), (III-2-4), (III-2-5) (III-2-6) illustrent la comparaison entre l'évolution des retraits totaux expérimentaux issus de notre étude et les retraits totaux estimés par les quatre codes de calcul des différents BAP étudiés (1BAP5, 2BAP5, 1BAP10, 2BAP10, 1BAP20, 2BAP20).

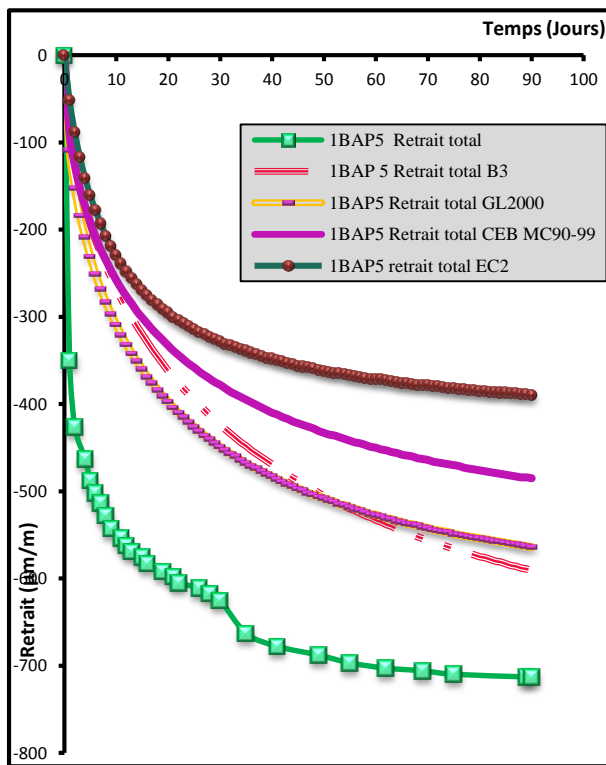


Figure III-2-1 : Comparaison des retraits totaux expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP5.

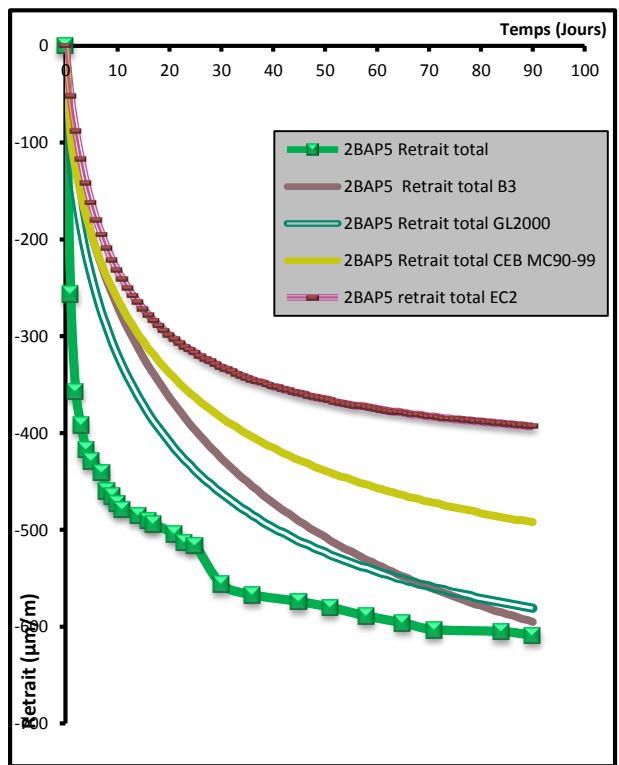


Figure III-2-2 : Comparaison des retraits totaux expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP5.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

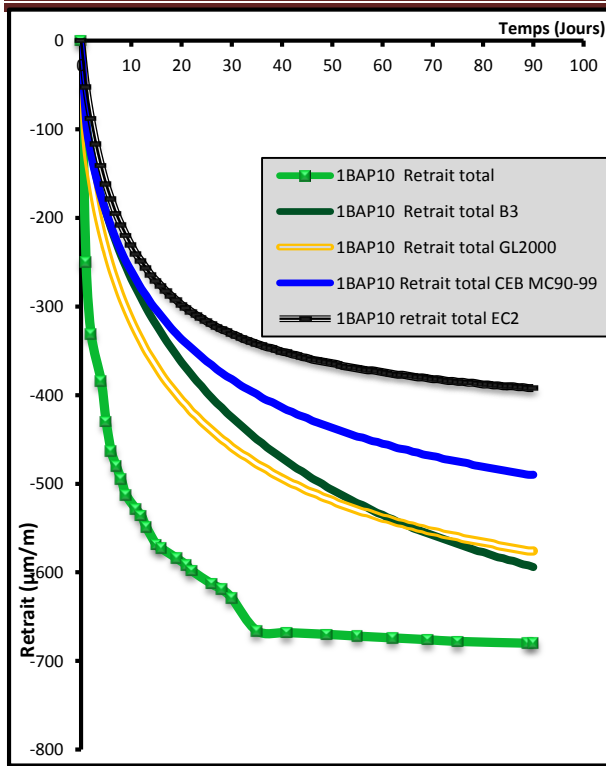


Figure III-2-3 : Comparaison des retraits totaux expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP10

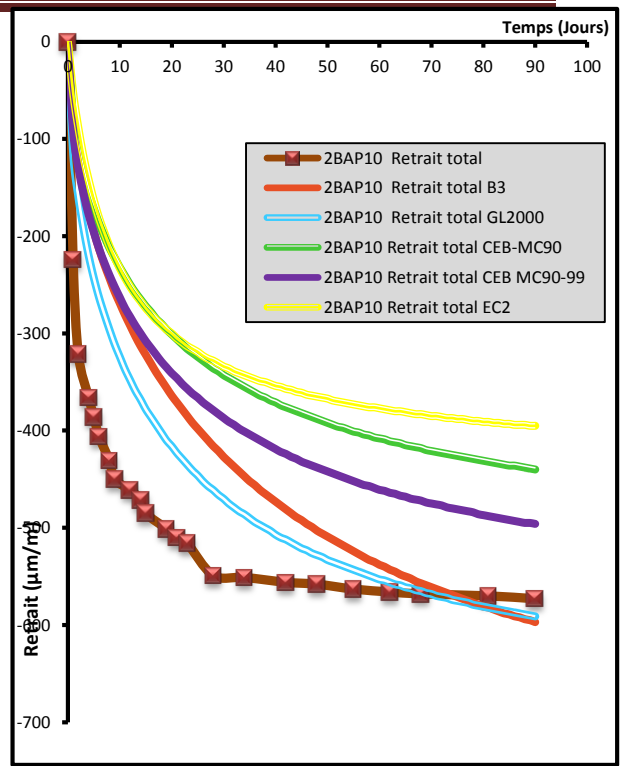


Figure III-2-4 : Comparaison des retraits totaux expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP10

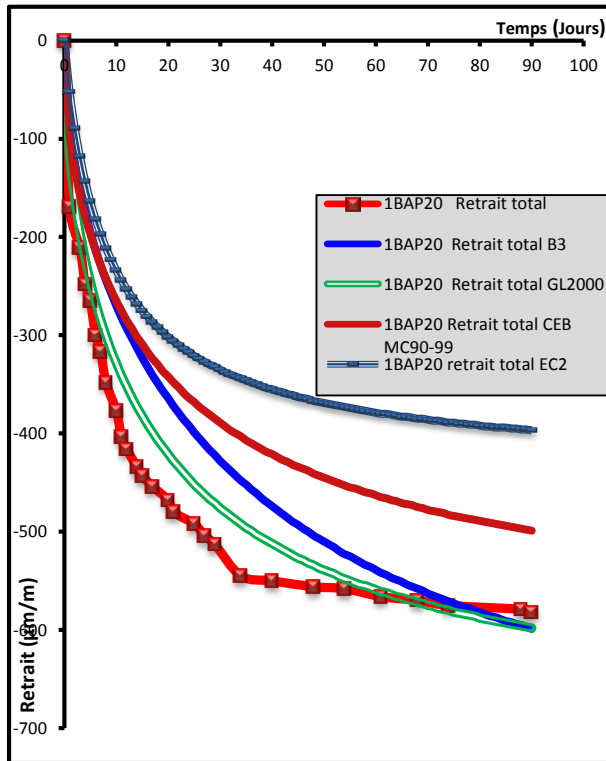


Figure III-2-5 : Comparaison des retraits totaux expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP20

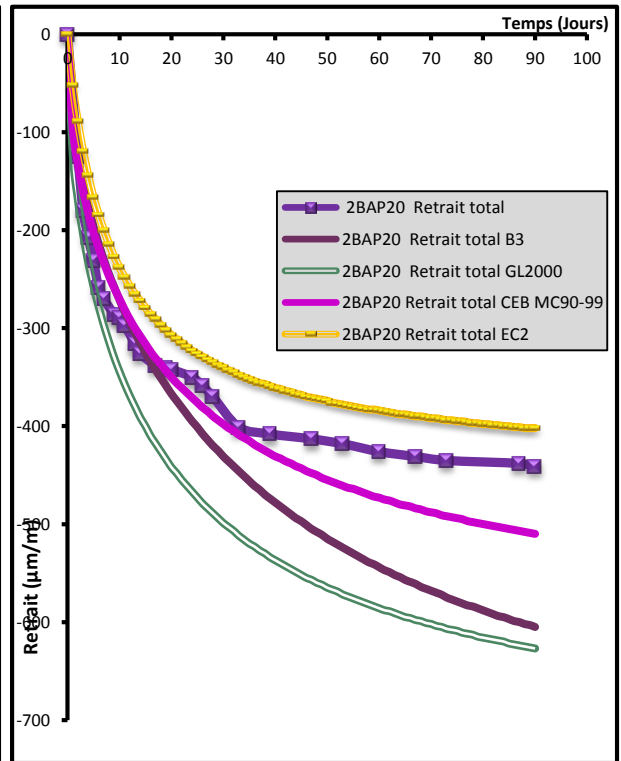


Figure III-2-6 : Comparaison des retraits totaux expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP20

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

D'après les figures (III-2-1), (III-2-3), nous remarquons que les retrait totaux des bétons 1BAP5, 1BAP10, des modèles B3 et GL2000 sont proches des mesures expérimentales, avec un écart d'environ (15%) pour B3 et (17%) pour GL2000, alors que les modèles eurocode 2 et CEB MC90-99 sous estiment le retrait total. Les valeurs étant comprises dans le fuseau de variabilité de (30%) pour CEB MC90-99 et de (45%) pour l'Eurocode 2.

Les valeurs de retrait total calculées à partir des modèles américains le B3 et GL2000, présentés sur les figures (III-2-2), (III-2-4) et (III-2-5) correspondent convenablement aux valeurs expérimentales mais les écarts étant significatifs pour l'Eurocode 2 avec un écart de 30% (2BAP5 et 2BAP10) et un écart de 16% pour le CEB MC 90-99, nous pouvons voir aussi que le retrait total du 1BAP20 est proche des modèles européens.

Pour la figure (III-2-6), nous remarquons que le retrait total expérimental du 2BAP20 est proche des modèles européens avec un écart de 10% et loin des modèles américains de 30%.

III-2-2-2 Retrait endogène :

Les Figures (III-2-7), (III-2-8), (III-2-9), (III-2-10), (III-2-11) et (III-2-12) présentent une confrontation des évolutions expérimentales de retrait endogène avec les prédictions des modèles européens et américains. Le retrait endogène est une caractéristique propre du matériau, dépend de la nature du ciment et de la résistance mécanique à 28 jours.

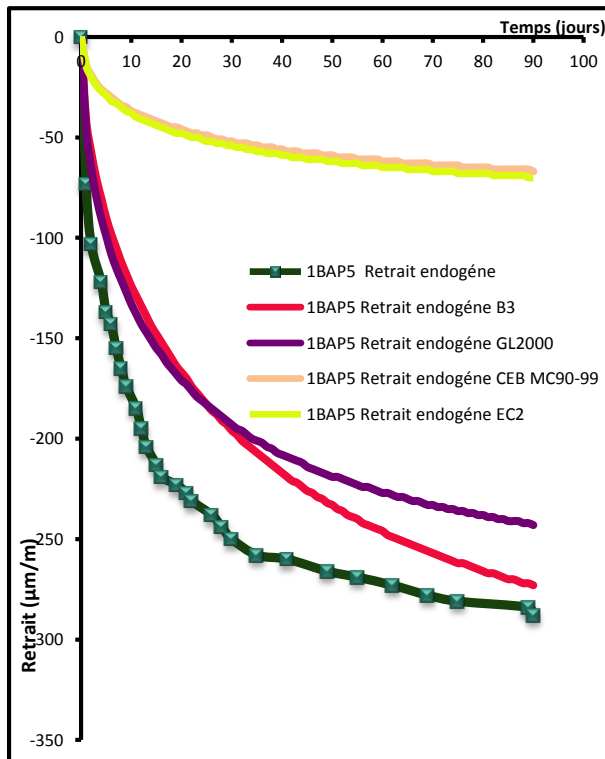


Figure III-2-7 : Comparaison des retraits endogènes expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP5.

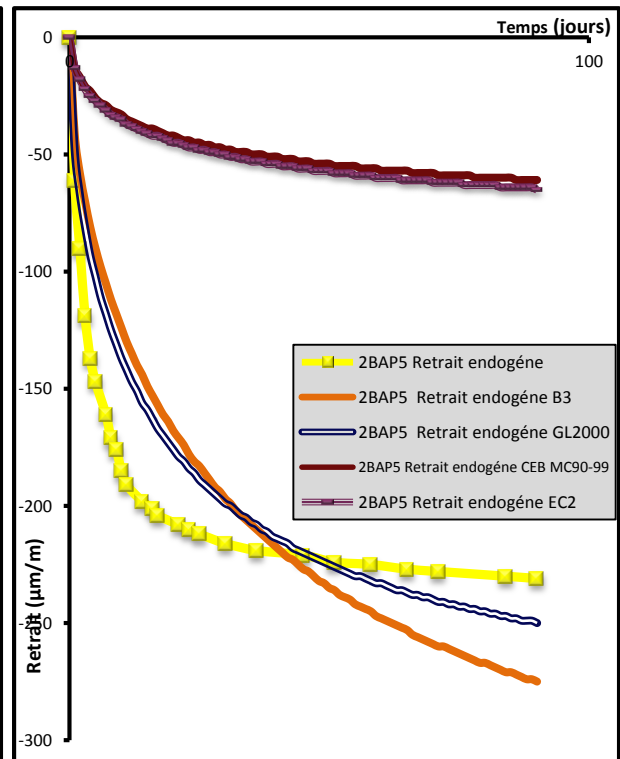


Figure III-2-8 : Comparaison des retraits endogènes expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP5.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

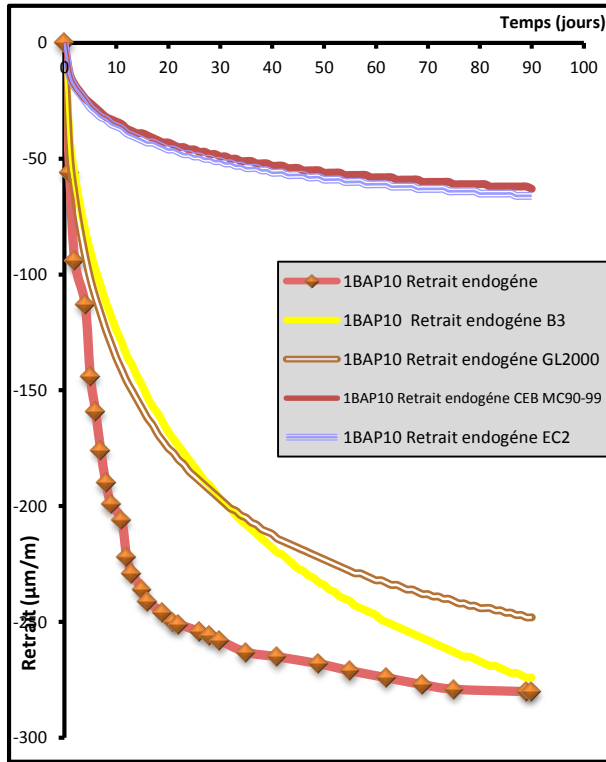


Figure III-2-9 : Comparaison des retraits endogènes expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP10.

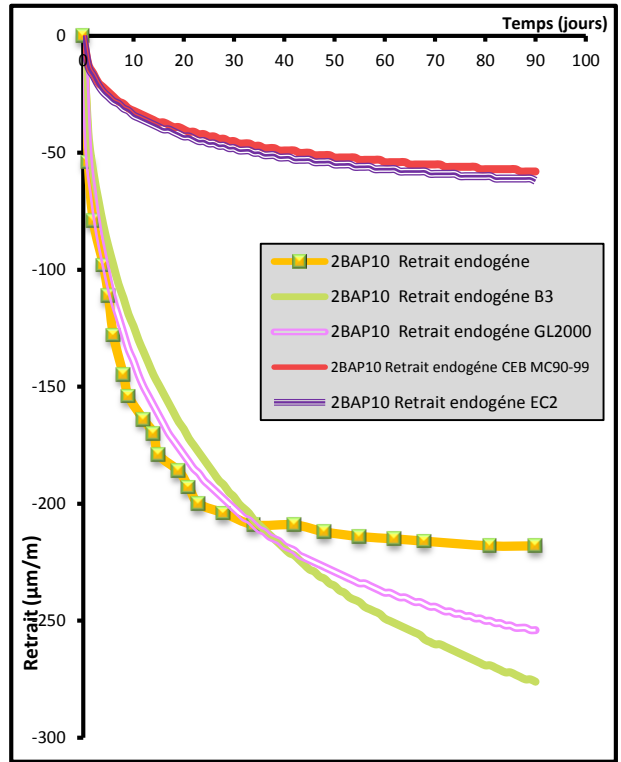


Figure III-2-10 : Comparaison des retraits endogènes expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP10.

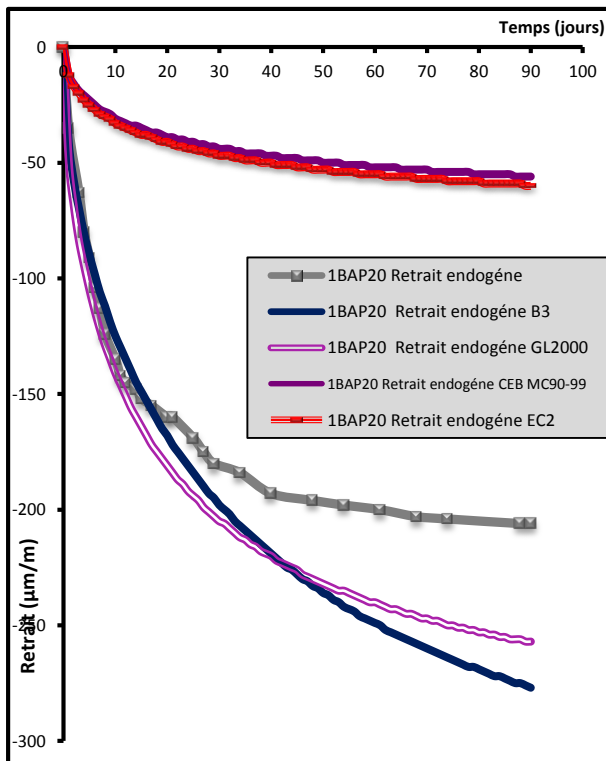


Figure III-2-11 : Comparaison des retraits endogènes expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP20.

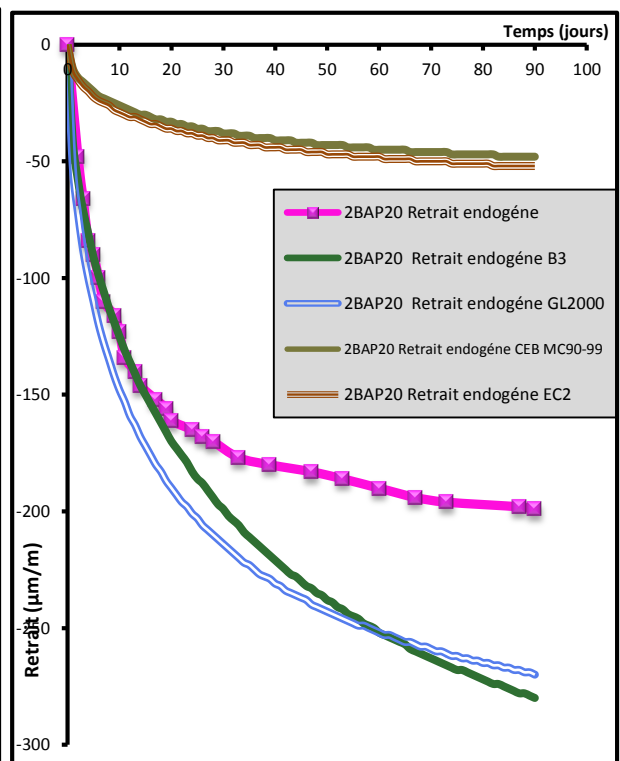


Figure III-2-12 : Comparaison des retraits endogènes expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP20.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

L'analyse des courbes représentées sur les figures (III-2-7 jusqu'à III-2-12) permet d'apporter les remarques suivantes :

- Les modèles prédictifs européens sous estiment les valeurs expérimentales du retrait endogène des six bétons étudiés 1BAP5, 2BAP5, 1BAP10, 2BAP10, 1BAP20, 2BAP20, avec des écarts relatifs pouvant atteindre 75%.
- Pour les modèles prédictifs américains, il est difficile de trouver des corrélations, les résultats sont dispersés. D'après les figures, (III-2-7) et (III-2-9) nous constatons que les valeurs calculées de retrait endogène par le B3 et GL2000 sont très proche de l'expérimentale pour 1BAP5 et 1BAP10 mais des écarts significatifs sont observés pour 2BAP5 (figure, III-2-8), 2BAP10 (figure, III-2-10), 1BAP20 (figure, III-2-11) et 2BAP20 (figure, III-2-12) nous remarquons que les deux modèles B3 et GL2000 marquent des valeurs supérieur allant de 10% jusqu'à 45%.

II-2-2-3 Retrait de dessiccation :

A partir des retraits totaux et des retraits endogènes mesurés expérimentalement, il est possible de calculer le retrait de dessiccation par une simple différence.

Les règlements américains ne donnent pas de valeurs de retrait de dessiccation en revanche seuls les modèles européens CEB-FIP et Eurocode 2 décomposent la déformation de retrait en une déformation de retrait endogène et une déformation de retrait de dessiccation.

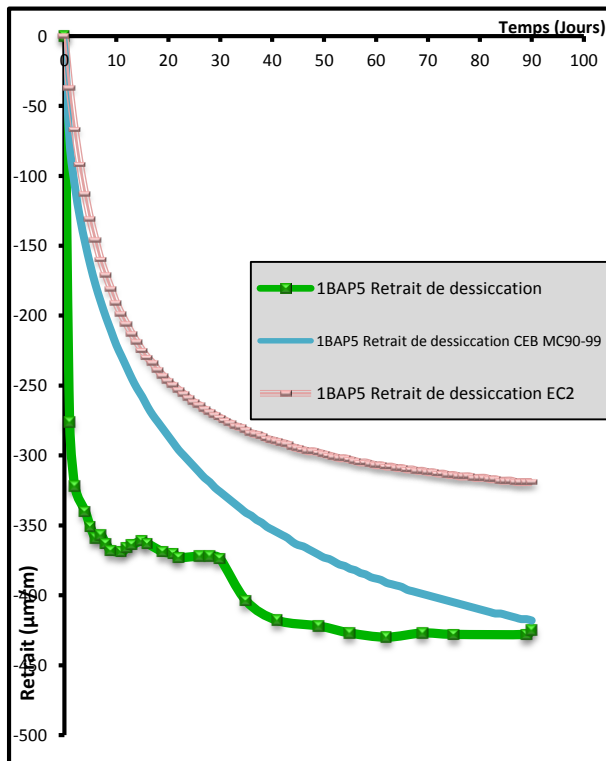


Figure III-2-13 : Comparaison des retraits de dessiccations expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP5.

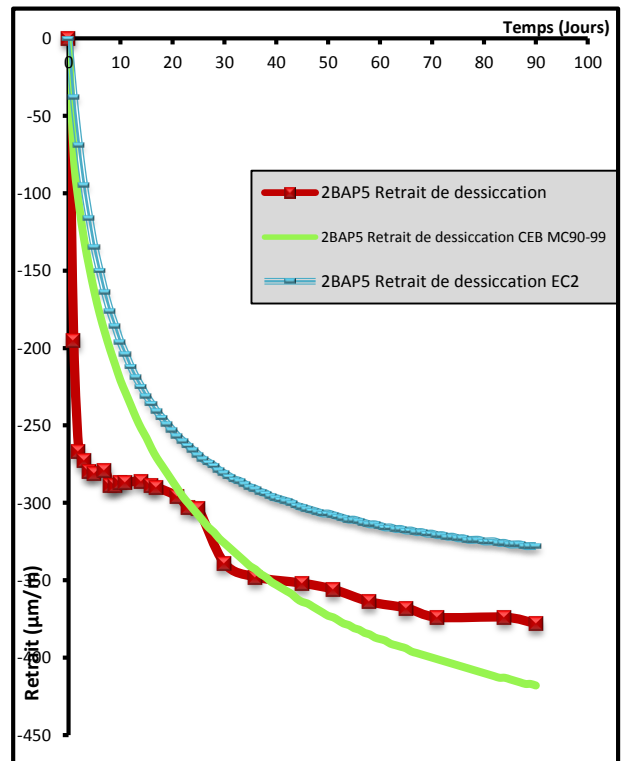


Figure III-2-14 : Comparaison des retraits de dessiccations expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP5.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

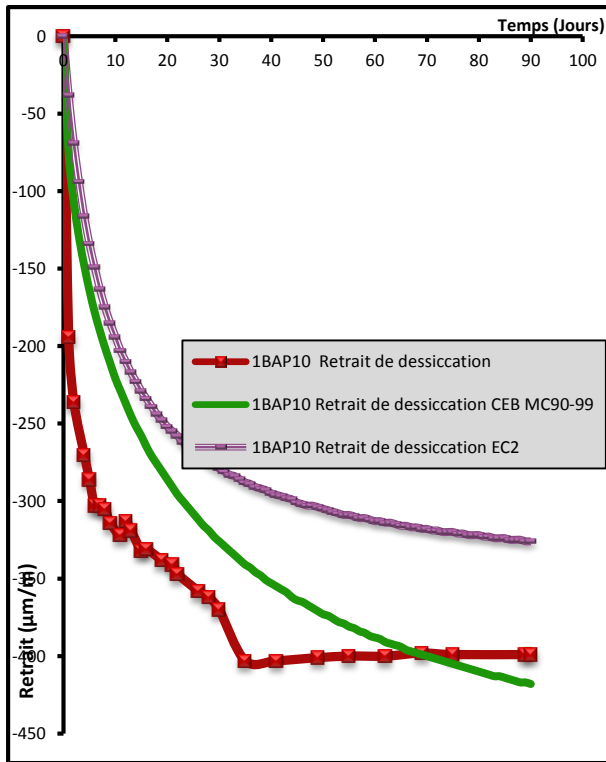


Figure III-2-15 : Comparaison des retraits de dessiccations expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP10.

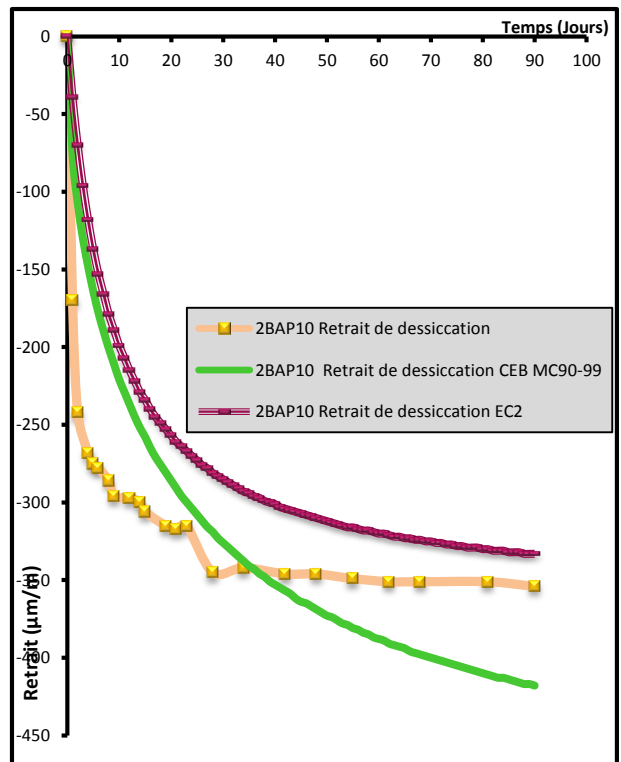


Figure III-2-16 : Comparaison des retraits de dessiccations expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP10.

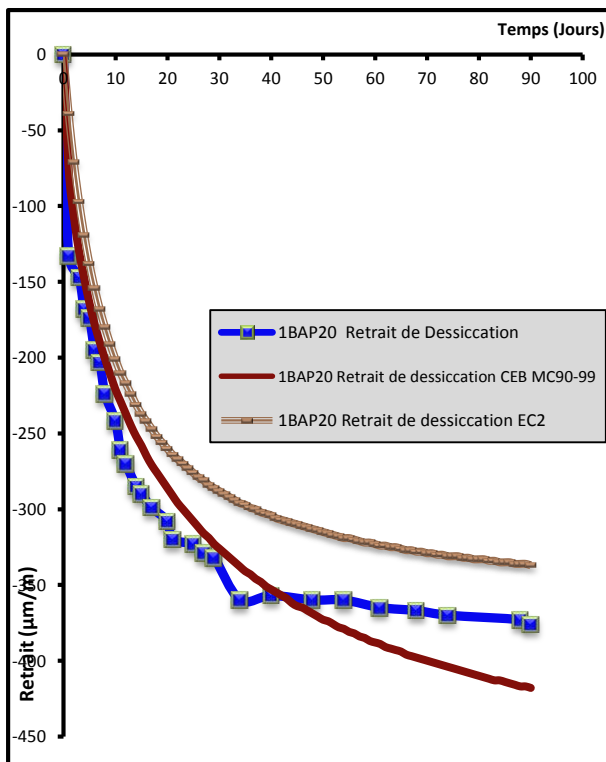


Figure III-2-17 : Comparaison des retraits de dessiccations expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP20.

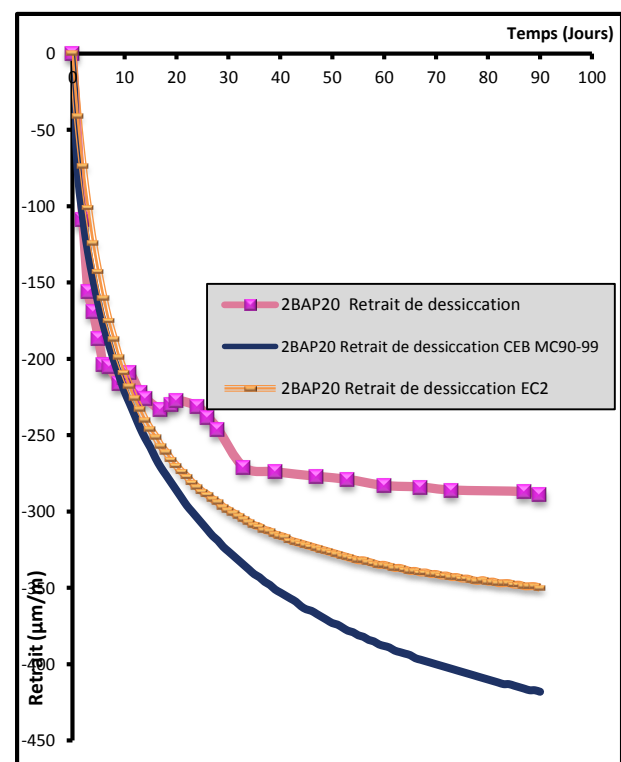


Figure III-2-18 : Comparaison des retraits de dessiccations expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP20.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

Similairement aux résultats du retrait endogène, les résultats de retrait de dessiccation sont aussi dispersés.

La confrontation des résultats obtenus par calculs (CEB MC 90-99 et Eurocode 2) à ceux issus des essais expérimentaux montre que ces résultats s'inscrivent dans le fuseau ($\pm 35\%$).

Les différences entre les valeurs calculés et les résultats expérimentales sont plus marquées pour l'Eurocode 2 ou nous remarquons une sous-estimation de l'ordre de 10% à 20%, sauf pour 2BAP5 (figure III-2-18) ou on a remarqué une surestimation de 17%.

Les figures (III-2-13), (III-2-14), (III-2-15), (III-2-16), mettent en évidence une bonne corrélation des résultats calculés par CEB MC 90-99 et les résultats expérimentaux, toute fois un écart moyen de (30%) est observé sur les courbes des figures (III-2-17), (III-2-18).

III-2-2-4 Gonflement :

Il est également important de rappeler que le domaine de validité de ces modèles prédictifs fait référence à une humidité relative maximale de l'environnement de 100%, alors que nous avons étudié le gonflement sur des éprouvettes immergées dans l'eau.

Cette sous-estimation de l'ordre de (-75%) est très nette pour les deux règlements européens et américains quel que soit le type de béton (1BAP5, 1BAP10, 1BAP10, 2BAP5, 2BAP10, 2BAP20).

Nous voyons bien que c'est cette limite de validité qui est à l'origine des écarts importants constatés.

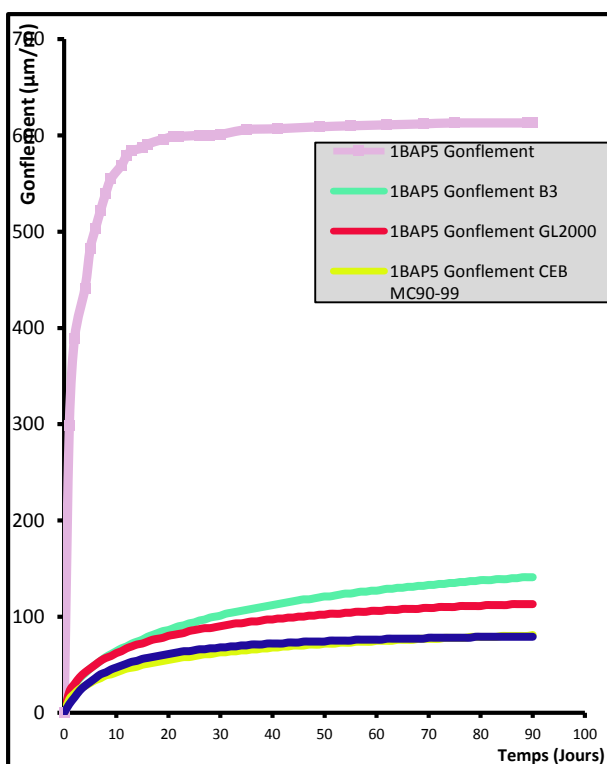


Figure III-2-19 : Comparaison des gonflements expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP5.

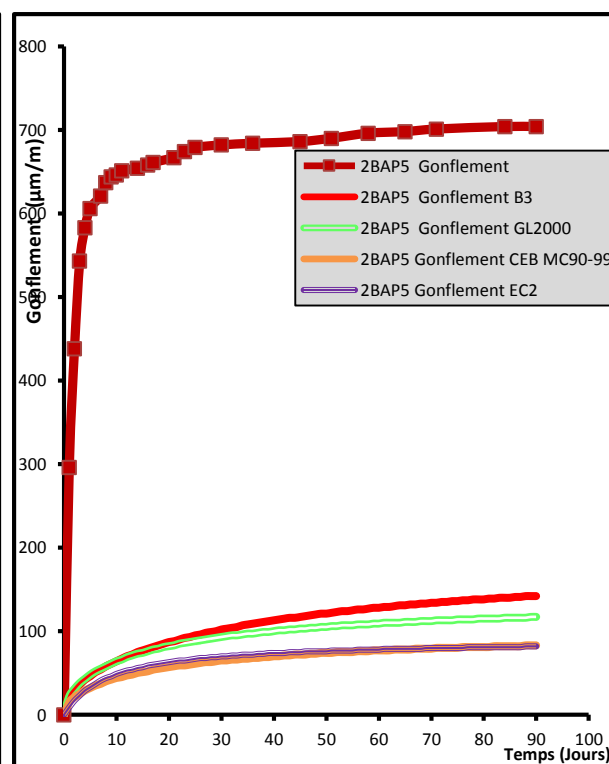


Figure III-2-20 : Comparaison des gonflements expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP5.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

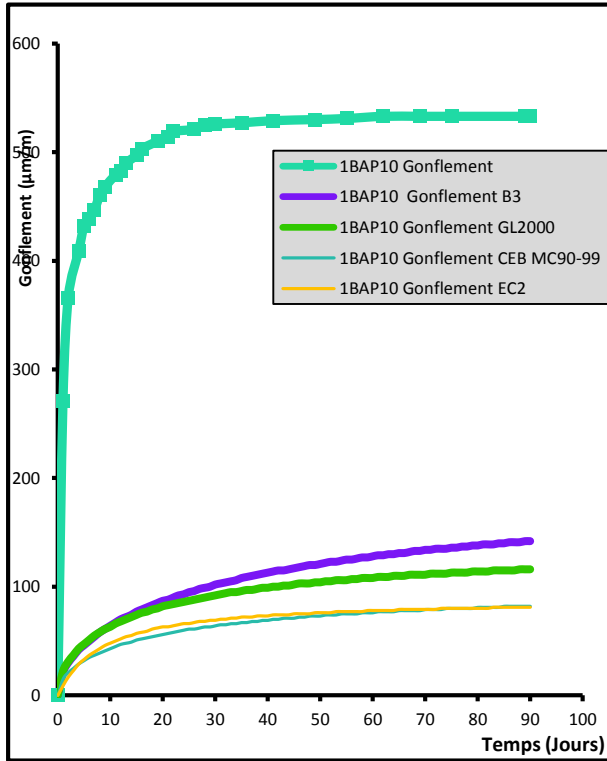


Figure III-2-21 : Comparaison des gonflements expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP10.

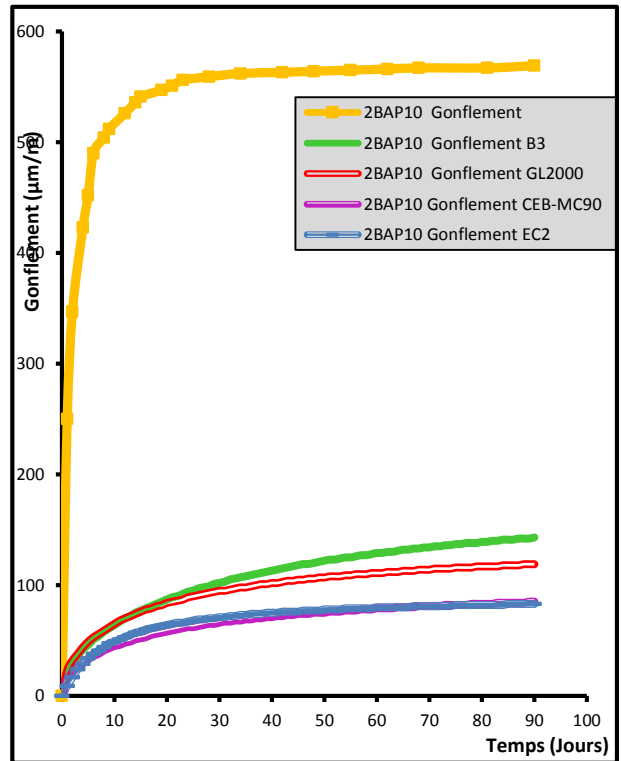


Figure III-2-22 : Comparaison des gonflements expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP10.

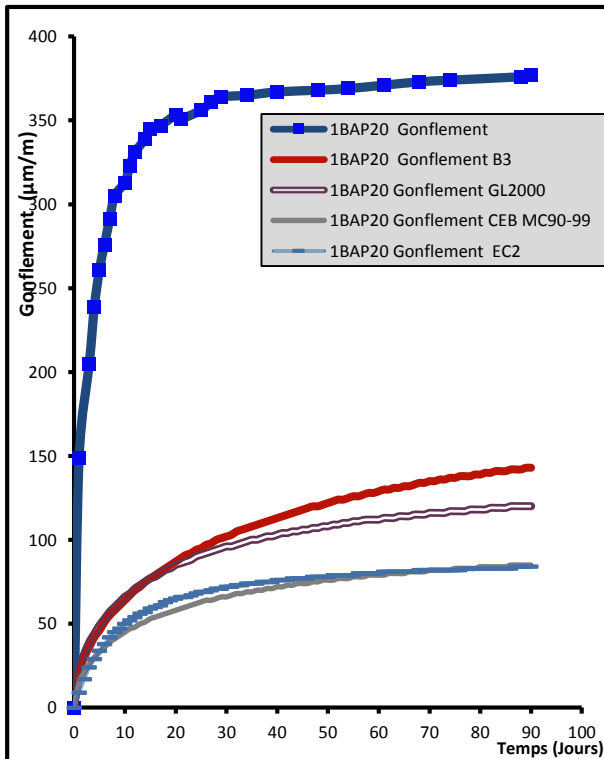


Figure III-2-23 : Comparaison des gonflements expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 1BAP20.

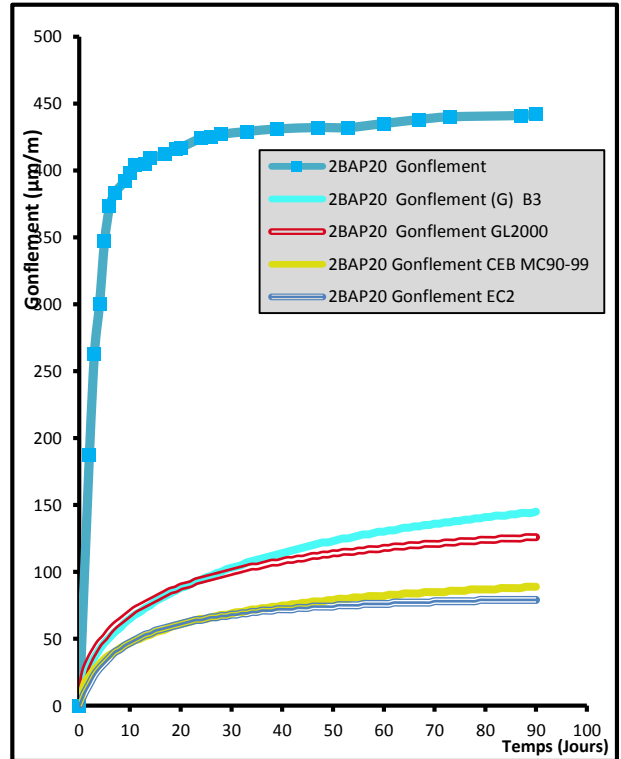


Figure III-2-24 : Comparaison des gonflements expérimentaux et calculés par les modèles de prédiction américains et européens du béton 2BAP20.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

III-2-3 Analyse de la précision des modèles prédictifs:

Nous tenons à signaler que la confrontation de nos résultats a été réalisée sur un fuseau obtenu sur des BO, car ce fuseau est inexistant pour les BAP.

Les résultats de mesure de retrait à 3 mois (90 Jours) effectués dans cette étude expérimentale sont représentés en fonction des valeurs calculées à partir des quatre modèles règlementaires de prédiction de retrait qui sont : B3, GL2000, CEB MC 90-99, Eurocode 2. La droite en trait plein symbolise l'égalité entre les valeurs expérimentales et celles calculées. Nous avons aussi tracé les droites d'incertitudes (en trait discontinu) à ($\pm 30\%$) représentant une dispersion admissible sur un tel type de mesures.

III-2-3-1 Retrait total :

Les figures (III-2-25), (III-2-26), (III-2-27) et (III-2-28) illustrent la corrélation entre les retraits totaux expérimentaux issus de notre étude et les retraits estimés par les quatre codes de calcul (B3, GL2000, CEB MC 90-99, Eurocode 2).

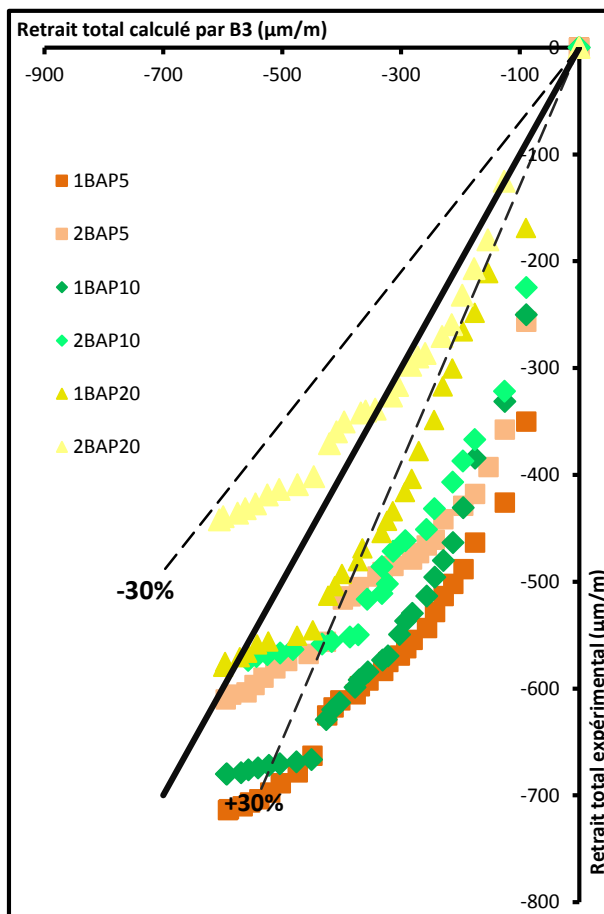


Figure III-2-25: Corrélation entre les retraits totaux calculés par le modèle B3 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.

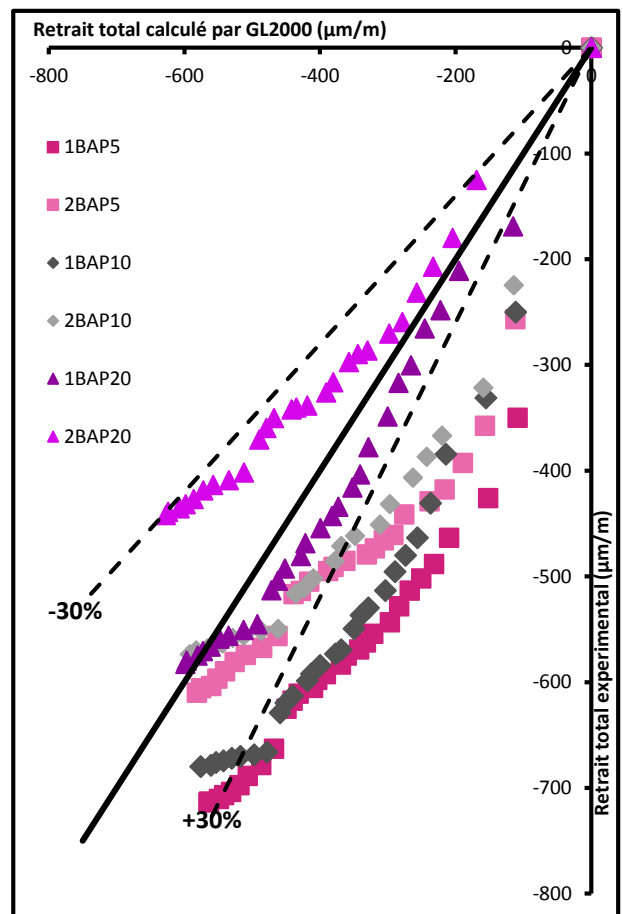


Figure III-2-26: Corrélation entre les retraits totaux calculés par le modèle GL2000 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.

Les valeurs de retrait total calculées à partir du B3 (figure III-2-25) et GL 2000 (figure III-2-26) correspondent convenablement aux valeurs expérimentales, toutes les valeurs étant comprises dans le fuseau de variabilité de ($\pm 30\%$).

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

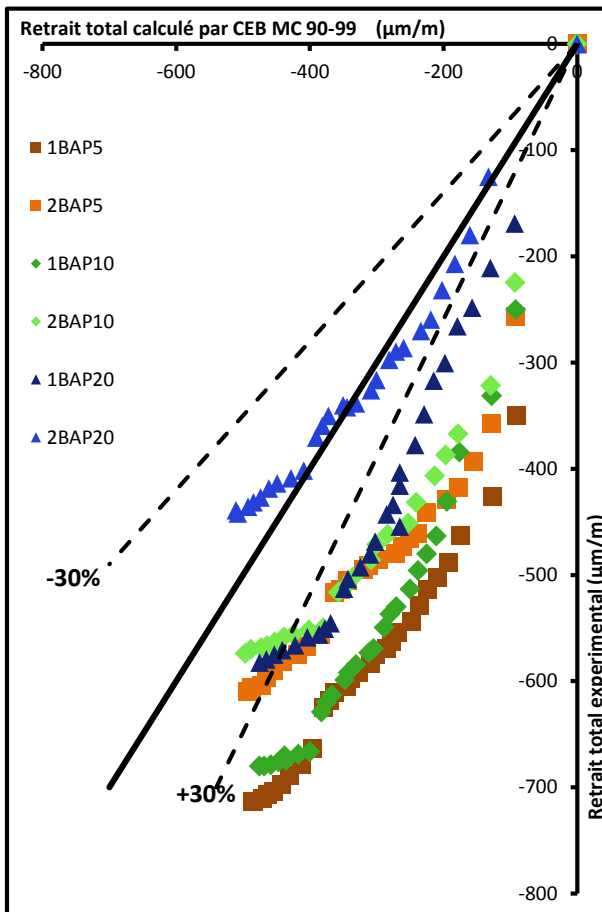


Figure III-2-27: Corrélation entre les retraits totaux calculé par le modèle CEB MC 90-99 et ceux mesurés expérimentalement à 90 jours.

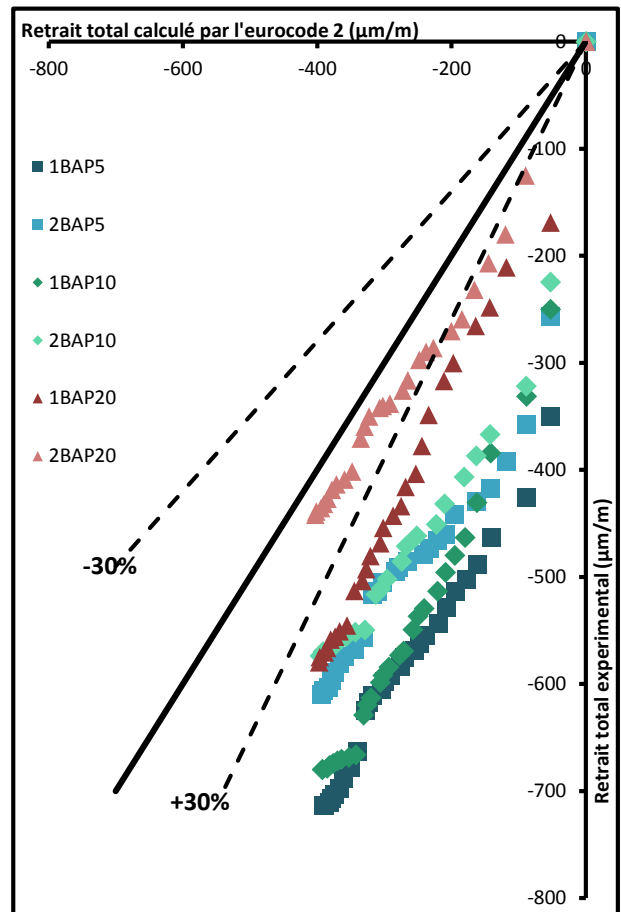


Figure III-2-28: Corrélation entre les retraits totaux calculés par le modèle Eurocode 2 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.

La comparaison des retraits totaux expérimentaux et calculés par l'Eurocode 2 et CEB MC 90-99, nous permet de constater que le modèle Eurocode 2 sous-estime les valeurs expérimentales avec un écart pouvant atteindre 82 %. Tandis que les écarts observés pour le modèle CEB MC 90-99 s'inscrivent ou sont proches du fuseau de variabilité de $\pm 30\%$

III-2-3-2 Retrait endogène :

Nous allons reporter sur les figures (III-2-29), (III-2-30), (III-2-31) et (III-2-32), les valeurs des différents résultats de retrait endogène des bétons déterminées expérimentalement en fonction de celles calculées par les différents modèles prédictifs (Modèle B3 et GL2000, CEB MC 90-99 et Eurocode 2).

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

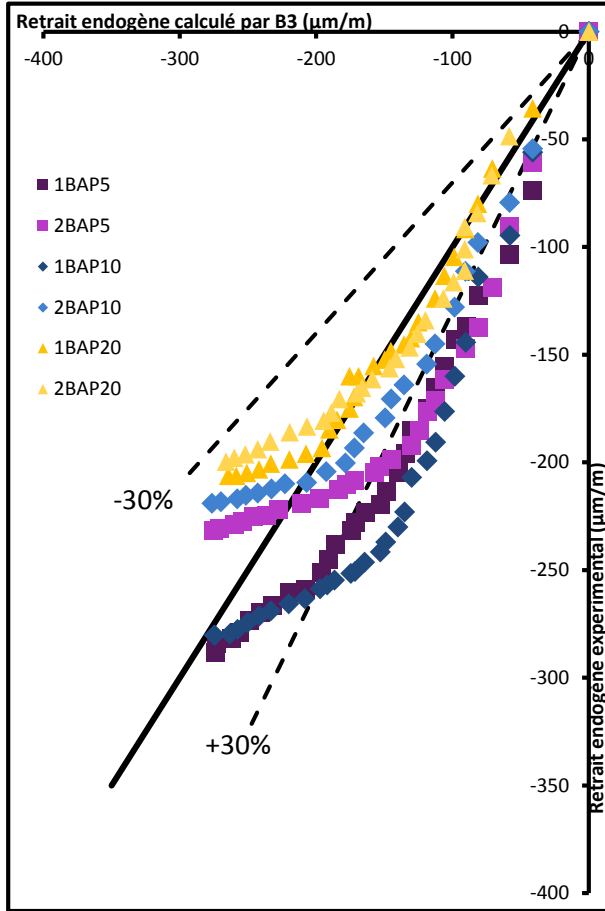


Figure III-2-29: Corrélation entre les retraits endogènes calculés par le modèle B3 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.

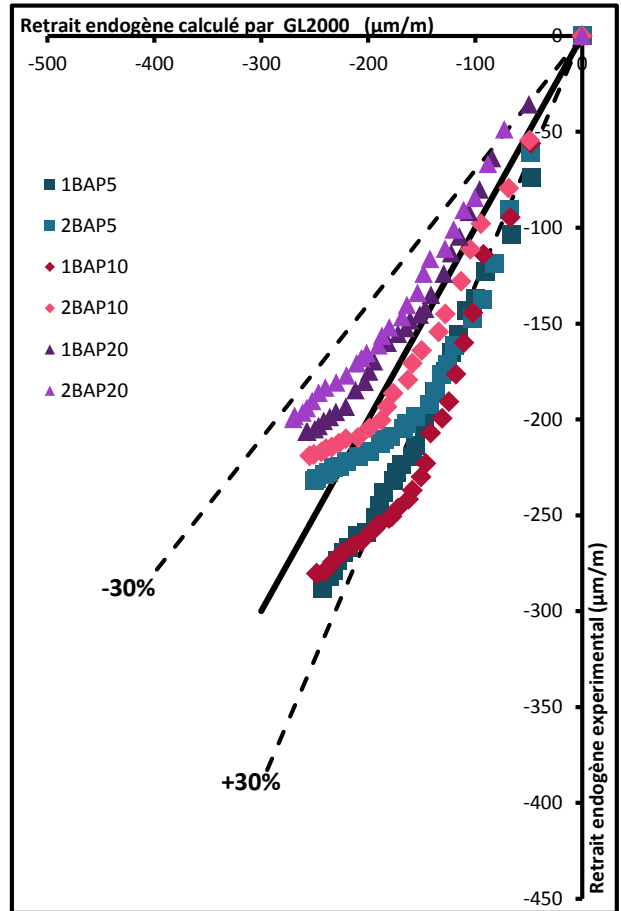


Figure III-2-30: Corrélation entre les retraits endogènes calculés par le modèle GL2000 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.

Les valeurs de retrait total calculées à partir du B3 (figure III-2-29) et GL 2000 (figure III-2-30) correspondent convenablement aux valeurs expérimentales, toutes les valeurs étant comprises dans le fuseau de variabilité de ($\pm 30\%$).

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

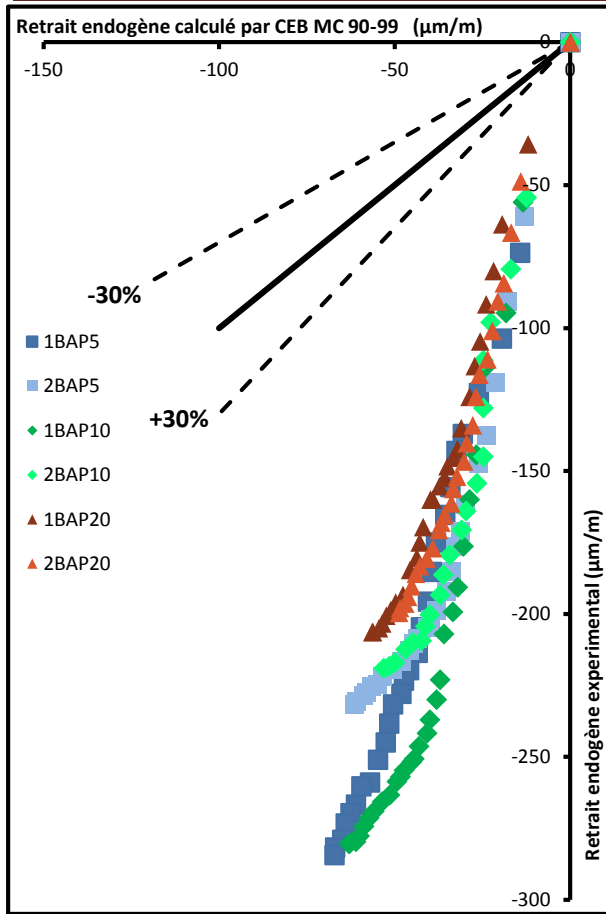


Figure III-2-31: Corrélation entre les retraits endogènes calculés par le modèle CEB MC 90-99 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.

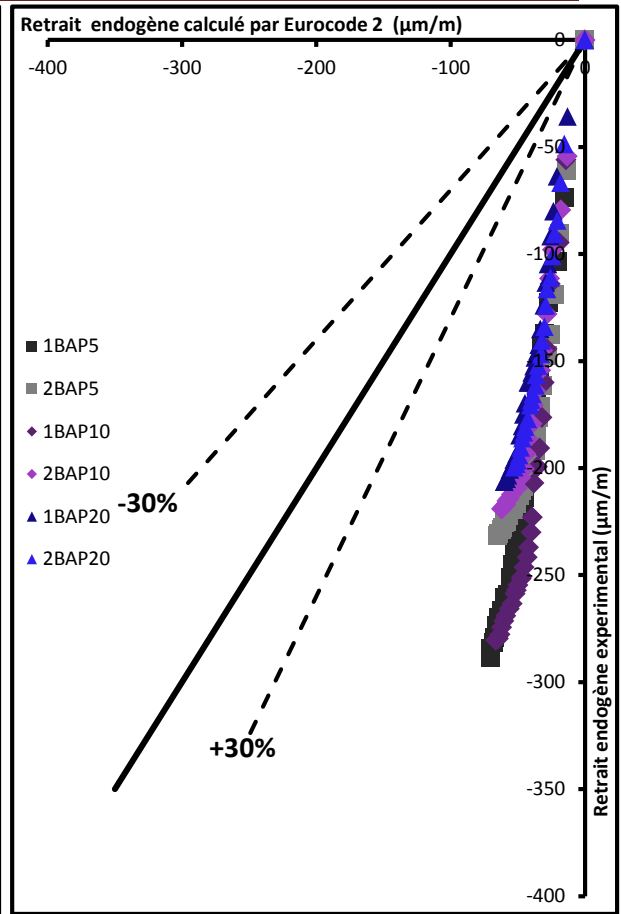


Figure III-2-32: Corrélation entre les retraits endogènes calculés par le modèle Eurocode 2 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.

Au regard de ces deux figures en dessus, nous constatons que ces deux modèles de calcul « CEB MC 90-99 et l’Eurocode 2 » sous-estiment considérablement le retrait endogène, aucun des bétons étudiés n’étant compris dans le fuseau de variabilité de $\pm 30\%$ (symbolisé par les droites en pointillés sur les graphiques). Cette sous-estimation est très nette pour les deux règlements quel que soit la finesse de filler calcaire utilisé (UF5, UF10, F20) et quelle que soit le rapport F/L (0.1 ou 0.2). Elle est d’environ -300% pour CEB MC 90-99 et -278% pour l’Eurocode 2.

III-2-3-3 Retrait de dessiccation :

Les Figures (III-2-33) et (III-2-34) présentent une confrontation des évolutions expérimentales de retrait de dessiccation « correspond à la différence entre le retrait total et le retrait endogène » avec les prédictions des CEB MC90-99 et Eurocode 2.

Comme nous avons mentionné précédemment, seuls les modèles européens prennent en compte le découplage du retrait total en une partition endogène et une partie de séchage « dessiccation ». C’est pour cette raison que, ne seront développés que les retraits de dessiccation des modèles CEB MC90-99 et Eurocode 2.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

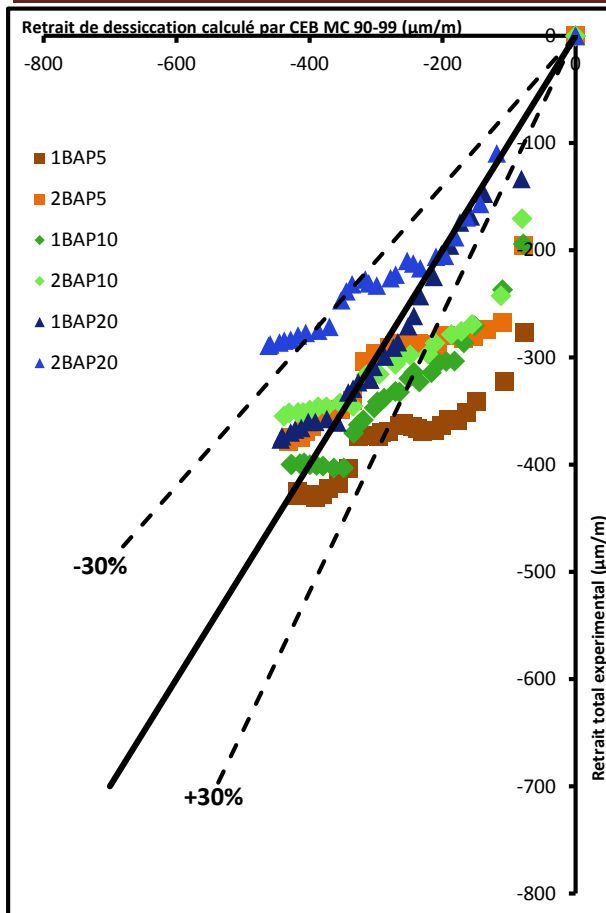


Figure III-2-33: Corrélation entre les retraits de dessiccation calculés par le modèle CEB MC 90-99 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.

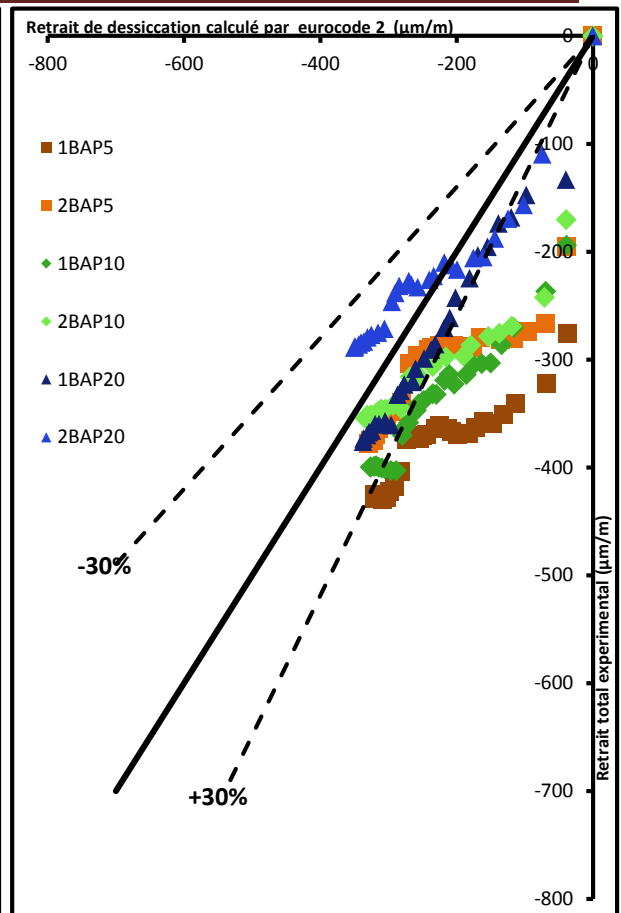


Figure III-2-34: Corrélation entre les retraits de dessiccation calculés par le modèle Eurocode 2 et ceux mesurés expérimentalement des six BAP à 90 jours.

Contrairement au retrait endogène, nous pouvons noter que les résultats de retrait de dessiccation calculés par les modèles CEB MC 90-99 et Eurocode 2 sont faiblement dispersés. Nous remarquons que les estimations de ces deux modèles conduisent à de bonnes prévisions du retrait de dessiccation.

III-2-4 Etude paramétrique :

Le but de cette étude paramétrique est de quantifier l'effet de certains paramètres tels que, la finesse du calcaire et le rapport (Filler/Filler+Ciment) sur le retrait total, endogène et dessiccation calculés par les différents modèles réglementaires.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

a)Retrait total :

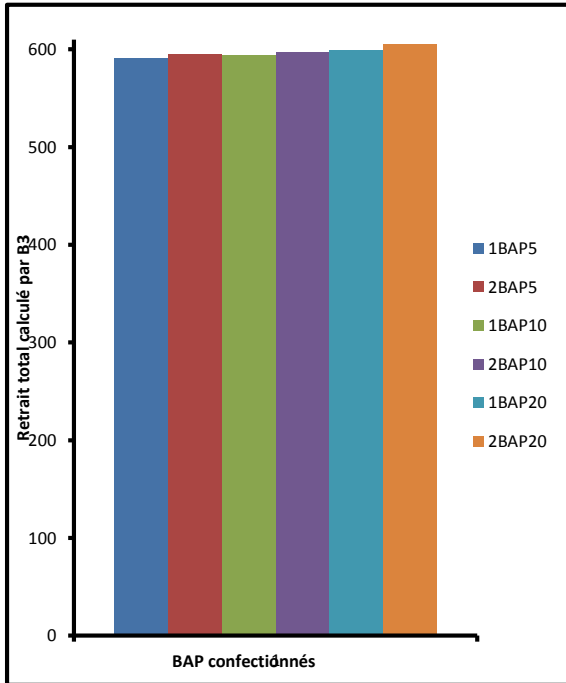


Figure III-2-35 : Retrait total calculé par le modèle B3.

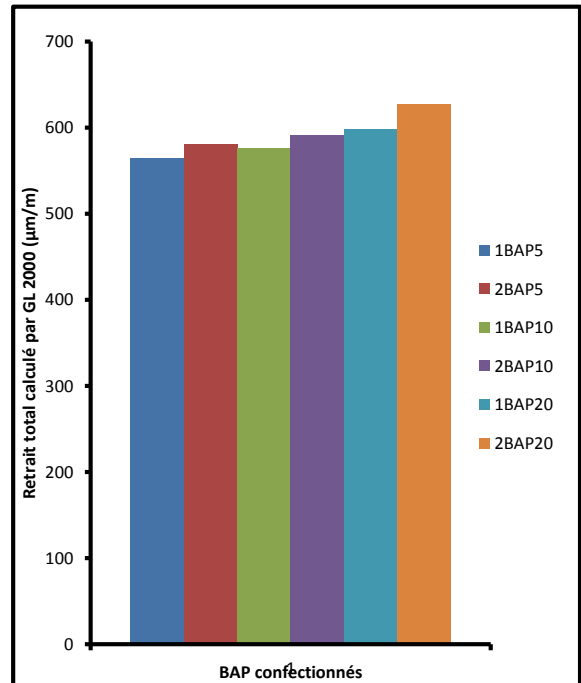


Figure III-2-36 : Retrait total calculé par le modèle GL2000.

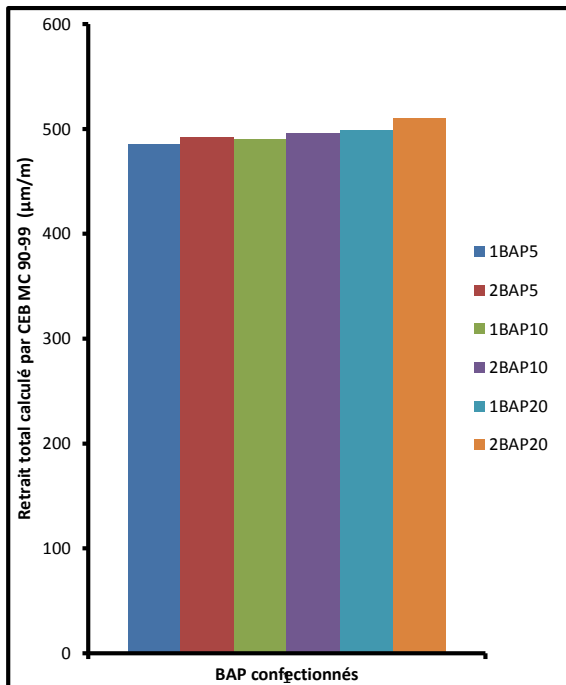


Figure III-2-37 : Retrait total calculé par le modèle CEB MC 90-99.

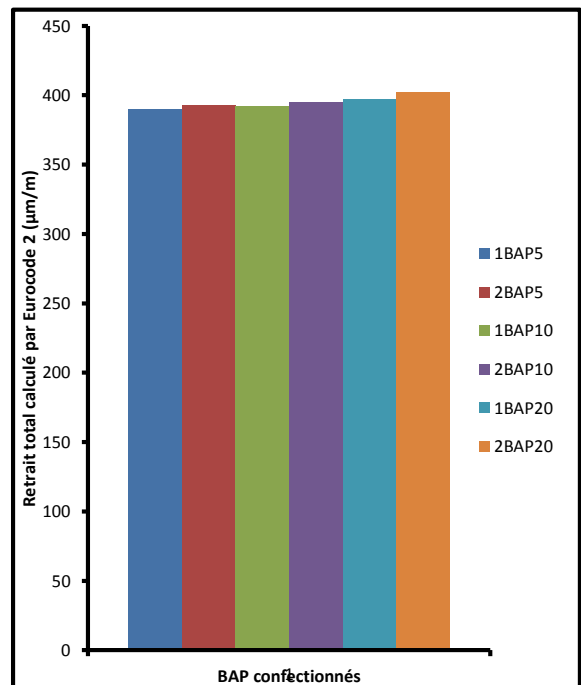


Figure III-2-38 : Retrait total calculé par le modèle Eurocode2.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

b) Retrait endogène :

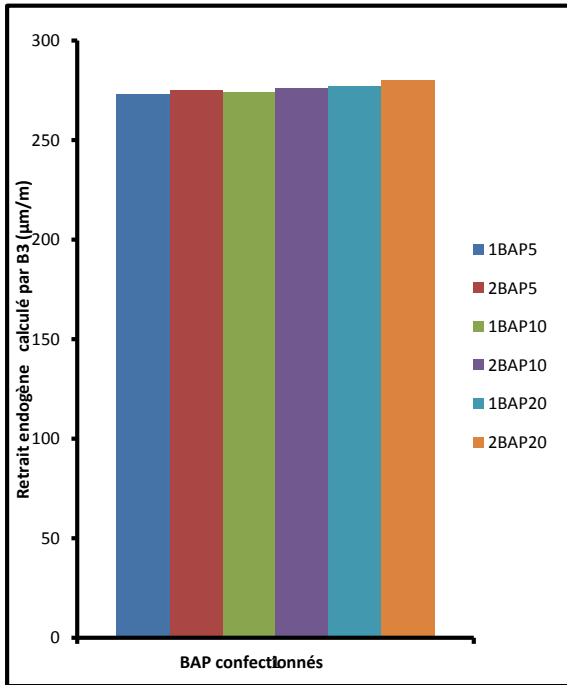


Figure III-2-39 : Retrait endogène calculé par le modèle B3.

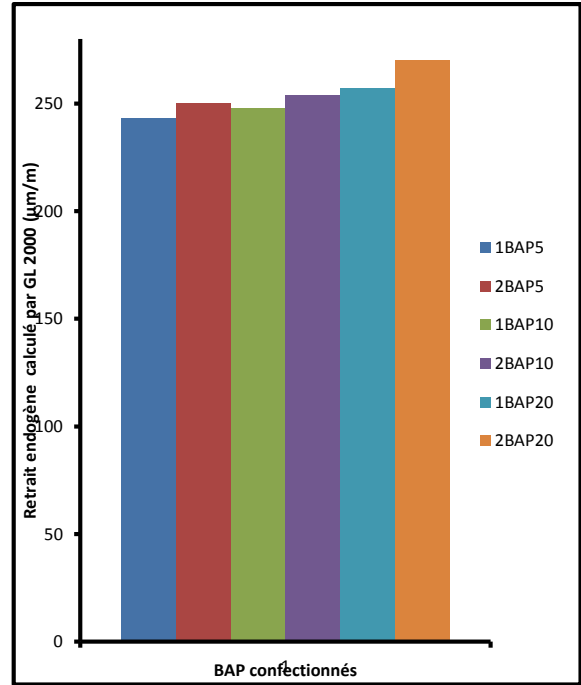


Figure III-2-40 : Retrait endogène calculé par le modèle GL2000.

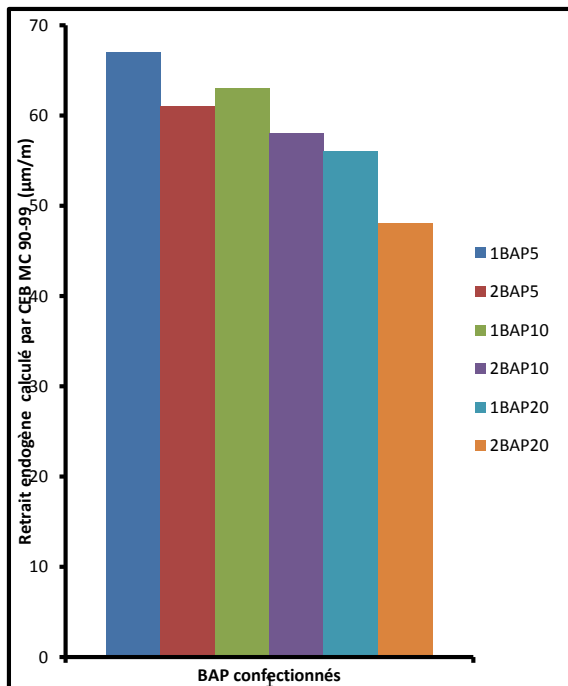


Figure III-2-41 : Retrait endogène calculé par le modèle CEB MC 90-99.

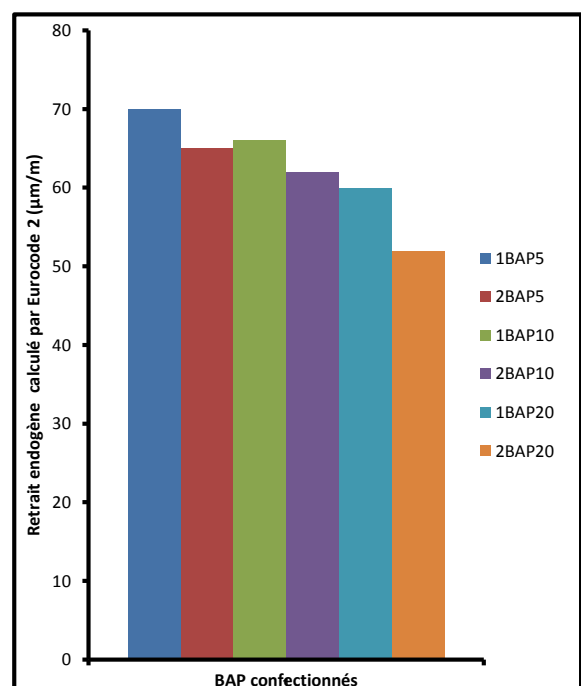


Figure III-2-42 : Retrait endogène calculé par le modèle Eurocode 2.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

c)Retrait de dessiccation :

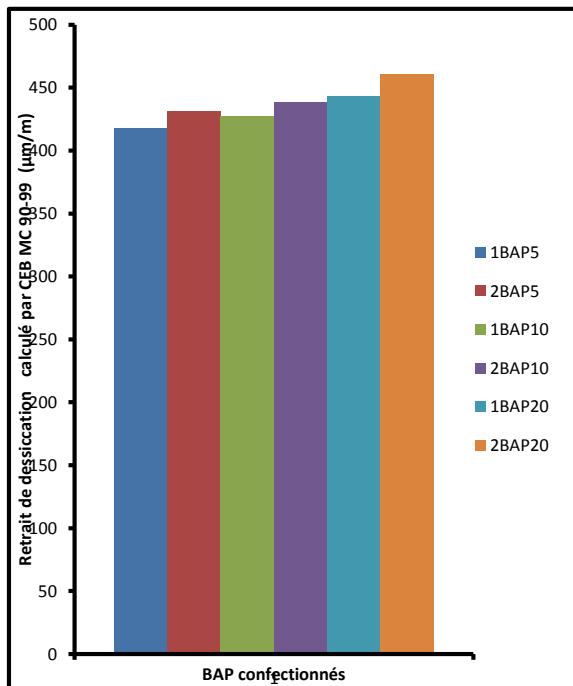


Figure III-2-43 : Retrait de dessiccation calculé par le modèle CEB MC 90-99.

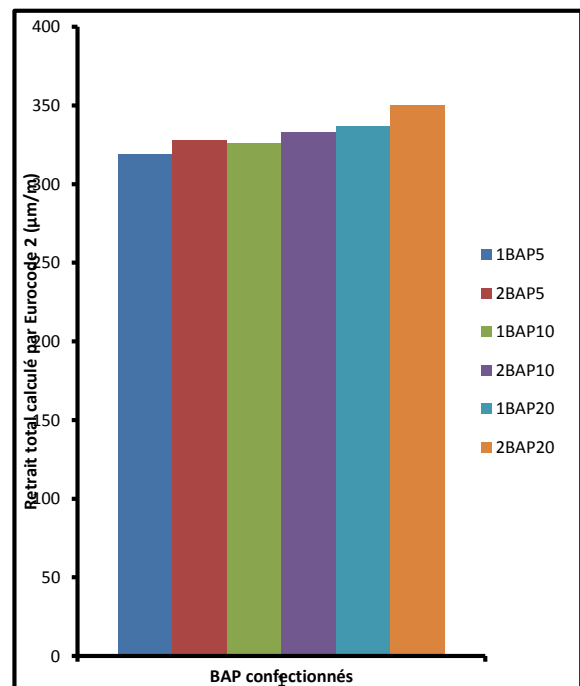


Figure III-2-44 : Retrait de dessiccation calculé par le modèle l'Eurocode 2.

A partir des figures représentées ci-dessus (III-2-35 jusqu'à III-2-44) plusieurs commentaires peuvent être effectués :

Les écarts entre les valeurs de retrait calculés par les différents modèles prédictifs pour les divers BAP confectionnés sont peu significatifs, on constate un effet négligeable de la finesse et le rapport F/L.

L'influence des paramètres étudiés (la finesse de l'addition calcaire et du rapport F/L) semble plus claire pour le retrait endogène des modèles européens que les modèles américains.

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

III-2-5 Optimisation et calage des paramètres :

Nous nous sommes intéressés au paramètre de retrait de dessiccation. Nous avons déterminés les lois mathématiques des courbes expérimentales et celles du code CEB MC 90-99, nous avons effectué une translation de la courbe issue du modèle réglementaire vers la courbe du modèle expérimentale. Cette translation a été quantifiée en évaluant un rapport de translation.

Cette technique pour les BAP (1BAP5 et 2BAP5) n'a pas donné des résultats satisfaisant (voir figure III-2-45 jusqu'à III-2-48) Pour cela nous avons opté pour la proposition de deux lois mathématiques dans deux domaines différents dont les lois sont :

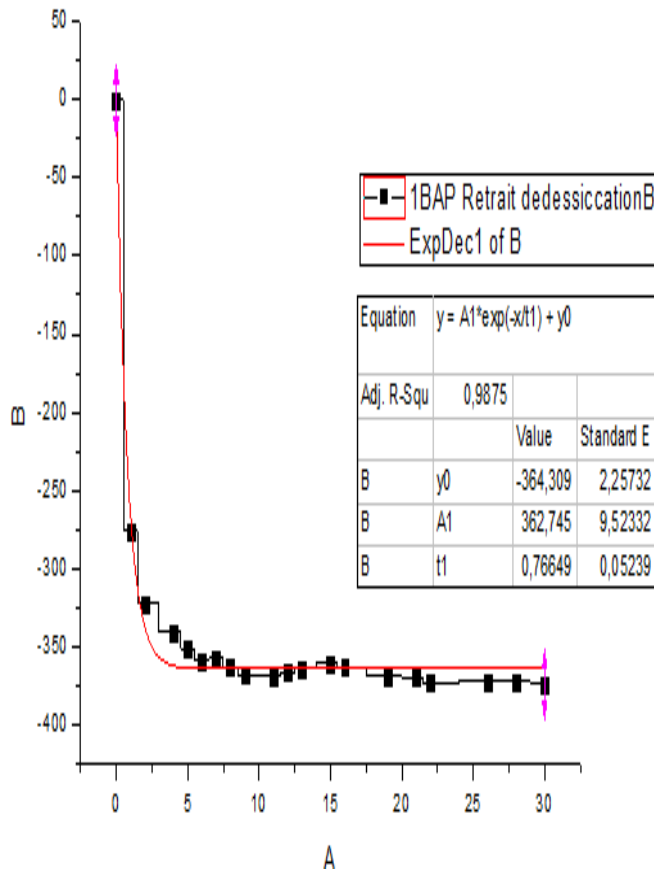


Figure III-2-45 : Représentation graphique des courbes expérimentales données par l'Origin.8 pour le retrait de dessiccation de 1BAP5 « premier domaine »

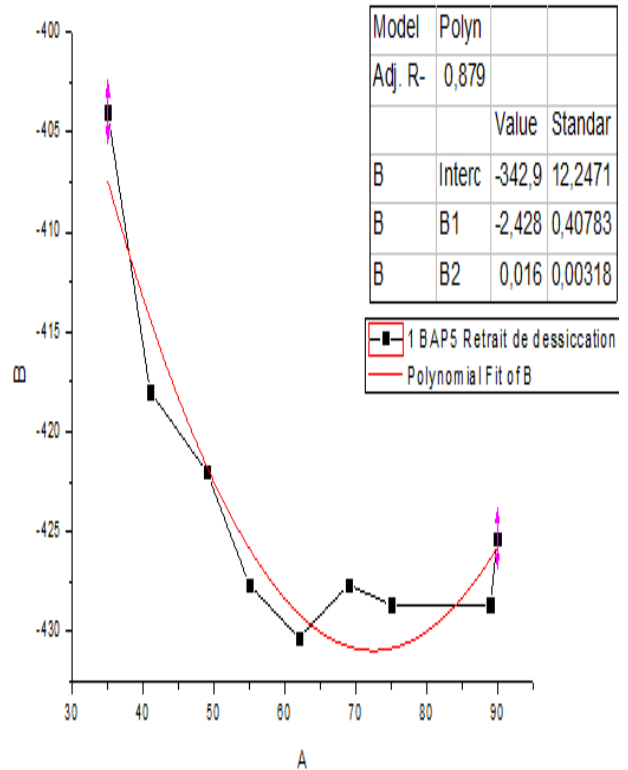


Figure III-2- 46: Représentation graphique des courbes expérimentales données par l'Origin.8 pour le retrait de dessiccation de 1BAP5 « deuxième domaine »

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES RESULTATS EXPERIMENTAUX

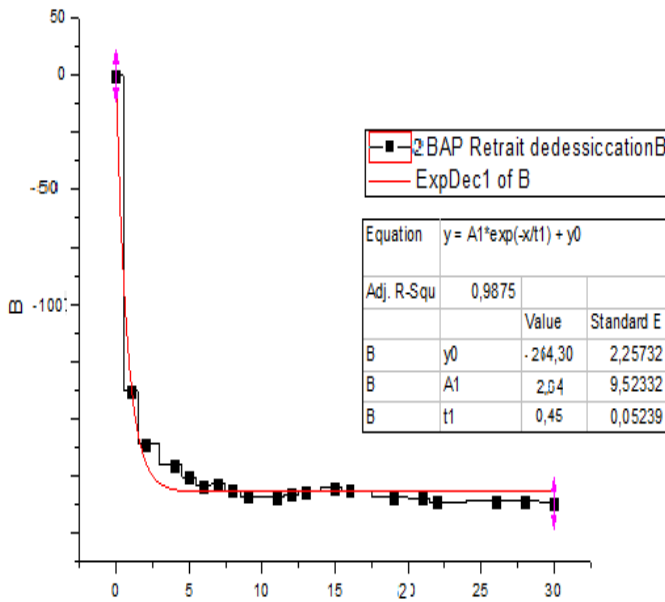


Figure III-2-47 : Représentation graphique des courbes expérimentales données par l'Origin.8 pour le retrait de dessiccation de 2BAP5 « premier domaine »

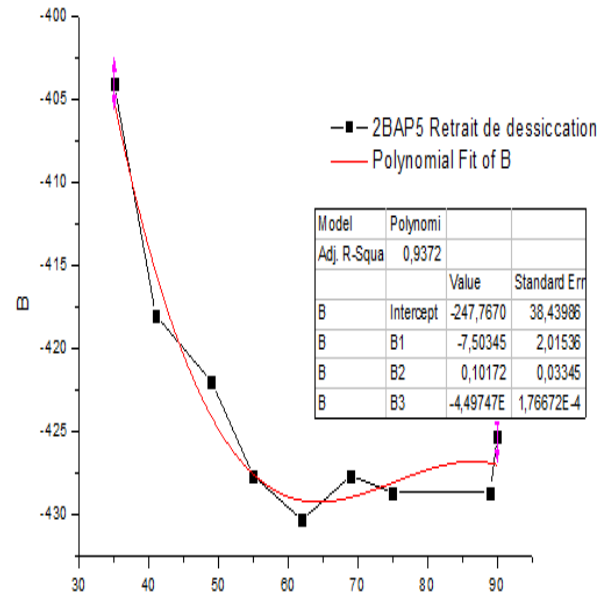


Figure III-2-48 : Représentation graphique des courbes expérimentales données par l'Origin.8 pour le retrait de dessiccation de 2BAP5 « deuxième

Mais, ORIGIN 8, donne des bons résultats pour 1BAP20 et 2BAP20 :

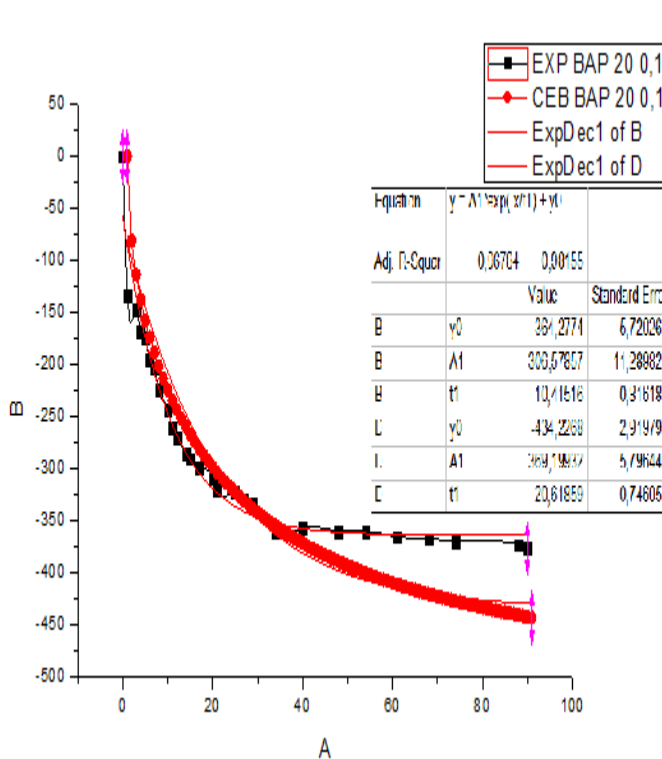


Figure III-2-49 : Représentation graphique des courbes expérimentales données par l'Origin.8 pour le retrait de dessiccation de 1BAP20

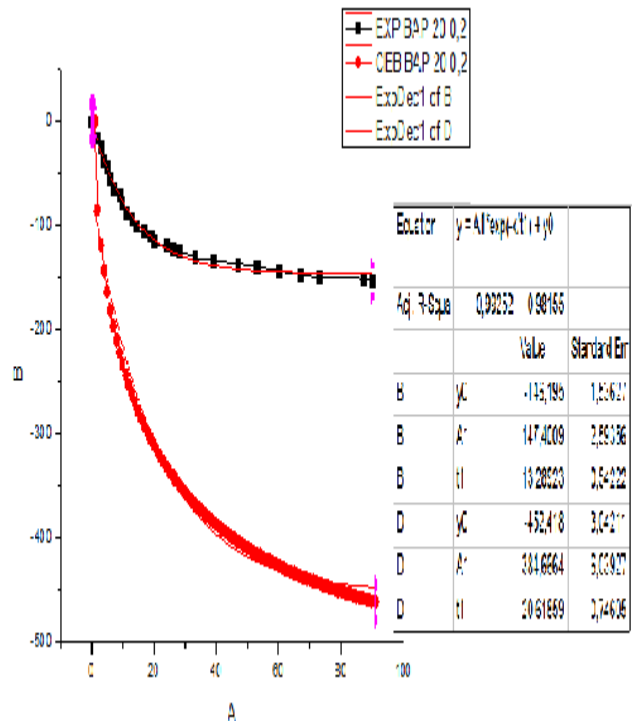


Figure III-2-50 : Représentation graphique des courbes expérimentales données par l'Origin.8 pour le retrait de dessiccation de 2BAP20

PARTIE III : APPROCHE REGLEMENTAIRE
CHAPITRE III-2 : CONFRONTATION DES MODELE REGLEMENTAIRES AVEC LES
RESULTATS EXPERIMENTAUX

Ce travail est bien sûr à titre indicatif, car pour le valider nous aurons besoin d'un plus grand nombre d'échantillon.

Nous nous sommes déjà prononcés sur le cône des résultats proposé par la littérature pour les bétons ordinaires. Donc ces essais donneront une base expérimentale qui servira à exprimer la loi mathématique pour les BAP.

Notons que les courbes règlementaires du code CEB MC 90-99 sont pour les bétons ordinaires, mais n'ayant aucune courbe de comparaison nous avons testé par rapport à cela.

Pour conclure, nous avons remarqué que les lois mathématiques évaluées sous environnement ORIGIN donnent une bonne appréciation des résultats pour les BAP (1BAP20 et 2BAP20).., alors que pour les autres les résultats sont la combinaison de deux lois mathématiques. Pour cette raison et pour le nombre d'essai réalisé qui n'est pas important, nous proposons une étude plus approfondi pour analyser et déterminer les paramètres les plus influant dans le retrait de dessiccation.

Conclusion de la partie III:

Les modèles de prévision de retrait visent à déterminer la déformation de retrait du béton de façon plus rapide et moins cher par rapport aux mesures expérimentales

Le critère de comparaison choisi étant la résistance mécanique en compression à 28 jours (F_{c28}) et l'humidité relative (HR).

Pour illustrer la situation actuelle des modèles codifiés de prévision du retrait, au premier lieu nous avons présenté une analyse comparative de plusieurs modèles proposés dans le cadre de différentes normes en usage en Europe (CEB MC 90, CEB MC 90-99 et Eurocode 2) ou aux Etats-Unis (B3, GL2000 et ACI), en se focalisant sur les paramètres qu'ils font intervenir et les conséquences de base sur la prévision des déformations du béton. Au deuxième lieu, nos résultats de la mesure de retrait sont comparés pour chaque béton avec les valeurs prédites de deux modèles américains (GL2000, B3) et d'autre part, avec deux modèles européens (Eurocode 2) et CEB MC 90-99).

Les résultats trouvés indique que que : les modèles de retrait B3 et GL2000 sont les meilleurs modèles pour la prédiction de retrait total et endogène, pour la prédiction du retrait de dessiccation, les modèles CEB MC 90-99 et l'Eurocode 2 donnent des meilleurs résultats que les autres modèles retenu pour l'analyse.

Les écarts constatés entre les valeurs expérimentales et celles calculées selon le modèle sont parfois importants, la comparaison de retrait total expérimental et calculé par CEB MC 90-99 et Eurocode 2, met en évidence l'incapacité de ces règlements à représenter correctement le retrait total et endogène.

Ces écarts importants entre règlement et expérience, déjà cités par d'autres auteurs [Munoz 00, Proust 02], peuvent avoir plusieurs causes : la nature des constituants (granulats, ciment), les modes opératoires employés, la taille des éprouvettes ou encore la date de première mesure (paramètre essentiel).

En termes de conditions environnementales, les différents modèles intègrent les mêmes paramètres, en dehors du type de cure considéré par les seuls modèle ACI et B3. Bien que tous les modèles fassent intervenir un facteur de dimensions géométriques traduisant l'effet d'échelle, il est à noter que celui-ci est défini différemment selon les codes utilisés.

Quelle que soit le modèle pris en considération, le calcul du gonflement est sous-estimé

Dans la littérature on trouve que :

- Goel et al. (2007) ont rapporté des résultats expérimentaux de Russell et Larson (1989) et ont comparé les résultats avec cinq modèles de prévision du retrait existants l'ACI 209R-92 modèle (ACI), le code CEB 90 Modèle), le modèle B3 (B3) et le modèle GL2000 et ils ont observé que le modèle GL2000 a donné les meilleurs résultats pour la prédiction du fluage et du retrait.

MAZLOOM et al (2004) ont rapporté en détail les résultats expérimentaux sur le comportement différé du BHP, contenant de fumée de silice. ainsi que les résultats du fluage et du retrait mesuré qui ont été comparés aux modèles l'ACI et CEB. Leurs conclusion est que ces deux modèles sous le retrait.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE :

Les bétons autoplaçants (BAP) constituent une nouvelle génération de béton. Ce sont des bétons très fluides, qui se mettent en place sans vibration. Cette propriété peut être obtenue par l'emploi de superplastifiant et d'additions minérales. Ils offrent avec ces additifs des avantages économiques et techniques certains.

Avant de commencer notre mémoire, nous avons surtout remarqué que les bétons autoplaçants avaient été étudiés par la communauté internationale des chercheurs dans ce domaine. Ce nouveau béton a été surtout caractérisé à l'état frais ainsi qu'au niveau de sa formulation. Pour les autres paramètres tels que le retrait endogène ou de dessiccation très peu de travaux scientifiques ont été élaborés, et même la confrontation de ce nouveau matériau est réalisée par rapport au béton ordinaire. Ceci a motivé notre intérêt pour analyser ce phénomène au niveau des BAP.

Ce travail de recherche a été établi pour deux objectifs, le premier était de quantifier l'impact des facteurs de composition sur les caractéristiques mécaniques, les variations dimensionnelles et pondérales des bétons autoplaçants à base des matériaux locaux. Pour cela nous avons mené une investigation expérimentale basée sur une étude comparative de six BAP ayant la même formulation de base. Le deuxième objectif était d'appliquer aux BAP les modèles réglementaires de prédiction de retrait des bétons ordinaires les plus utilisés et les plus récents selon « RILEM » qui sont : CEB MC 90-99, Eurocode 2, B3 et GL2000. Pour relier la différence entre le béton ordinaire et le BAP et de définir dans cette humble tentative les domaines dans lequel ce nouveau béton est situé.

Pour mener à terme ce travail, nous avons procédé comme suit : Dans un premier temps, une revue bibliographique est faite sur les différents constituants des BAP (en se basant sur la microstructure de la pâte de ciment), leurs formulations et aussi un aperçu sur les différents essais auxquels doivent être testés à l'état frais et durci et son comportement à long terme (retrait et fluage). Par la suite nous avons mis en place un protocole expérimental pour la mesure de retrait. Finalement nous avons recherché le modèle de prévision le mieux adapté au phénomène étudié, qui doit être simple et doté d'un minimum de paramètres.

Afin de cerner certains phénomènes dus au retrait des BAP, nous nous sommes fixés un maximum de paramètres dont l'optique d'avoir des résultats cohérents et non influencés par des phénomènes couplés. A titre indicatif ces paramètres sont : « la masse de liant, le volume de pâte et le squelette granulaire ».

La finesse du filer calcaire ainsi que le taux de substitution de ciment par filler calcaire sont retenus pour notre étude. L'analyse menée sur ces différents paramètres ainsi que leurs influences sont mises en évidence.

L'analyse des résultats obtenus dans l'étude expérimentale nous a permis de faire les constatations suivantes, dont certaines ont déjà été discutées dans la littérature. Pour plus de précision ces principaux effets sont :

CONCLUSION GENERALE

- Effet granulaire agissant sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais et durcis.
- Effet physicochimique et microstructurales agissant sur l'évolution de l'hydratation du ciment.

Les autres constatations ont été faites sur l'état frais, la résistance mécanique et la variation dimensionnelle et pondérale.

Etat frais :

- Les bétons autoplaçants respectent les critères imposés par « AFGC » et sont susceptibles à ce titre d'être des bétons réalistes au point de vue industriel,
- Les bétons confectionnés à partir des matériaux locaux (calcaire) se révèlent stables et satisfaisants,
- La substitution partielle du ciment par des additions de type fillers calcaires a permis d'améliorer la fluidité des bétons autoplaçants. La fine de calcaire agit comme un «lubrifiant» et améliore l'ouvrabilité des bétons.

Résistances mécaniques :

- L'ordre de grandeur des résistances obtenues nous laisse dans la gamme des résistances usuelles des bétons autoplaçant.
- Les résistances à la compression et à la traction par flexion sont inversement proportionnelles avec le taux de substitution du ciment par des fillers calcaire sur la plage testé [10% , 20%],
- La finesse favorise la contribution des additions calcaire vis-à-vis de la résistance en compression et à la traction par flexion.

Variations dimensionnelles :

- Au-delà de 90 jours, les retraits n'évoluent quasiment pas ce qui est dû à l'affinement des pores et à la diminution de la porosité.
- L'ordre de grandeur des retraits mesurés dans notre recherche (retrait à 3 mois compris entre (400 et 720 $\mu\text{m}/\text{m}$) pour retrait total, (195 et 290 $\mu\text{m}/\text{m}$) pour retrait endogène et (440 et 615 $\mu\text{m}/\text{m}$) pour le gonflement sont proches des données citées dans la littérature.
- Le milieu de conservation influe d'une manière significative l'évolution des variations dimensionnelles.
- Les fillers calcaires utilisés dans les bétons autoplaçants pour remplacer une partie de ciment contribue à la réduction de la chaleur d'hydratation, et en conséquence la diminution du retrait total et endogène, en cohérence avec les résultats de (Manai1995, Turcry 2004).

CONCLUSION GENERALE

- L'augmentation du taux de substitution du ciment par du fillers calcaire dans les compositions des BAP de 10% à 20%, permet de réduire le retrait dans les milieux ambiant et couvert, par contre le gonflement dans le milieu immergé devient plus grand.
- Le filler calcaire a un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates. Turcry et *al.* (2005) qui ont constaté que l'emploi des fillers calcaires dans un béton induit une augmentation de la compacité et par conséquent une baisse du transfert d'humidité et du retrait de séchage.

Variations pondérales :

Le suivi de la masse des échantillons a été effectué sur les mêmes éprouvettes destinées à la mesure du retrait. On peut remarquer, une perte de masse dans les milieux ambiants et couverts (l'ordre de grandeur n'est pas le même) et une augmentation de la masse pour les bétons dans l'eau.

- Les fillers calcaires augmentent l'aptitude d'absorption d'eau pour les bétons autoplaçants.
- Le milieu de conservation influe d'une manière significative l'évolution des variations pondérales.

Corrélation perte de masse-retrait:

Pour ce phénomènes trois constatations peuvent être émises :

- La relation entre le retrait et la perte en poids du béton autoplaçants est quasi linéaire et continue.
- Le séchage est toujours accompagné de la perte de masse du matériau.
- Le retrait est proportionnel à la perte de masse.

Nous pouvons donc émettre une première conclusion à partir de toutes les hypothèses prises en considération dans cette étude:

Si **le volume de pâte est le même** dans tous les bétons, les caractéristiques mécaniques, les variations pondérales et dimensionnelles changent avec la finesse des fillers et le taux de substitution.

Concernant notre deuxième objectif, nous avons comparé les valeurs des déformations de retrait mesurées expérimentalement et celles établies à l'aide des modèles prédictifs de comportement différé sans charge, autrement dit « retrait ». Nous avons focalisé notre choix sur quatre modèles réglementaires usuellement utilisés: deux réglementations françaises «CEB MC 90-99 et l'Eurocode 2 », et deux réglementations américanises « B3 et GL2000 ».

- La prédiction du retrait total et endogène par les modèles américains « B3 et GL2000 » et du retrait de dessiccation par les modèles européens « CEB MC 90-99 et l'Eurocode 2 » était acceptable car elles donnent des valeurs comprises dans le fuseau d'incertitude de plus au moins 30%, usuellement admis pour ce type de mesures.

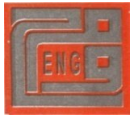
CONCLUSION GENERALE

- La prévision des retraits totaux et endogènes par les modèles européens CEB MC 90-99 et l'Eurocode 2 s'est révélée sensiblement différente de nos valeurs expérimentales. Différentes hypothèses ont été posées concernant ces écarts :
 - Origine des granulats,
 - Type de l'addition (inerte ou non inerte).
 - Dosage de l'addition
- Bien que les règles de dimensionnement prennent en compte l'influence de nombreux paramètres, des études portant sur les comportements des bétons de dernière génération (Bétons à Hautes et Très Hautes Performances, Bétons Autoplaçants,...), de formulations variées, montrent parfois des écarts significatifs entre les déformations différées expérimentales et leurs estimations par les différents modèles règlementaires.

Quand nous observons de telle disparité des résultats entre les modèles de prédiction et les valeurs expérimentales et avec l'apparition des nouveaux bétons et des nouveaux liants, le développement d'un modèle performant plus général devient nécessaire.

A l'issue de cette évaluation Microsoft Excel a été choisi comme un logiciel de ce projet par ce que Microsoft Excel est un programme populaire et facile à utiliser. Cela garantit que le futur chercheur (ou un lecteur avancé) peut comprendre et utiliser la programmation du modèle.

ANNEXES



ALCAL F20

Fiche technique

Le gisement El-khroub occupe la partie sud ouest du massif Oum Settas au sud-est de Constantine, il est constitué de calcaire d'origine néritique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.

Caractéristiques chimiques

CaCO ₃	99%
CaO	55,88%
SiO ₂	0,01%
Na ₂ O	0,01%
MgO	0,14%
Al ₂ O ₃	0,01%
Fe ₂ O ₃	0,01%
K ₂ O	0,01%
P ₂ O ₅	0,01%
TiO ₂	0,01%
Chlorure	0,005%
SO ₃ (soluble dans l'eau)	0,0021%
SO ₃ (soluble dans l'acide)	0,1115%
Soufre totale	0,0137%
Résidu insoluble	0,005%
Solubilité dans l'eau (Ws)	0,38%
Perte au feu	43,90%
Ph	9,24

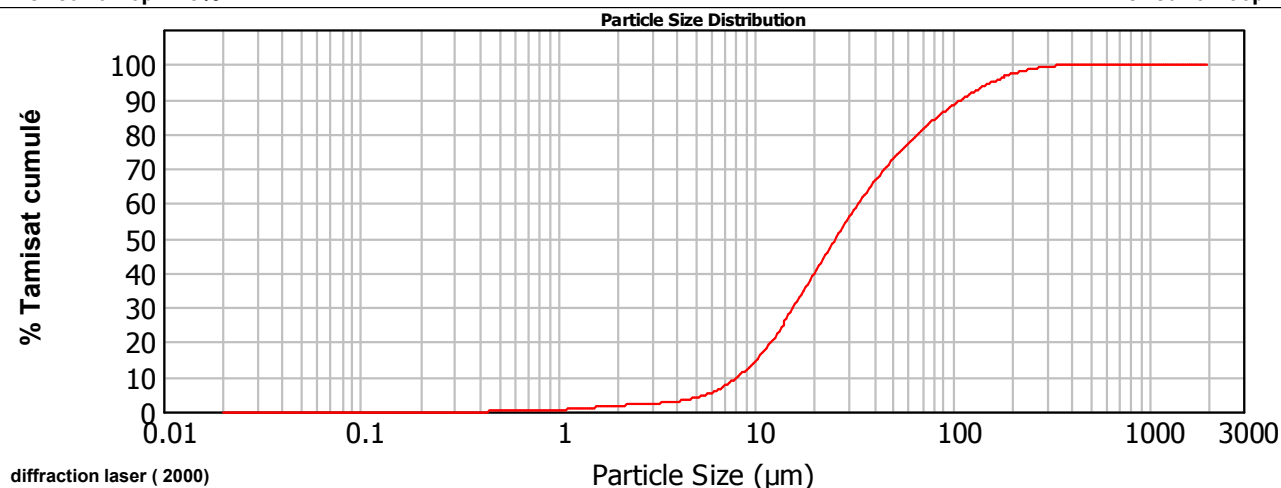
Caractéristiques physiques

Dureté (MOHS) :	3
Poids spécifique :	2,7
Densité apparente non tassée :	1,09
Prise d'huile (NF.T 30.022):	20g/100g de poudre
Prise D O P (NF.T 30.022):	29g/100g de poudre
Humidité à l'ensachage :	0,001%
Indice de réfraction :	1,71

Répartition granulométrique

Inférieur à 10 μ : 15%

Inférieur à 200 μ : 97%



Les valeurs figurant dans cette fiche technique sont des valeurs caractéristiques moyennes de la production

Conditionnement

Big-bag (1tonne)
Palettes houssées (48 sacs de 25kg)

Principales utilisations

Poudre et crème à récurer
Améliorant de pain
Détergent
Faïence
Etanchiété

B- ESSAIS DE CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS**B-1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump Flow) :****B-1-1 Objet de l'essai :**

Caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné.

B-1-2 Matériels nécessaires :

- Plateau équipé d'une plaque métallique plane de forme carrée d'au moins 90cm de côté.
- Cône d'Abrams, celui-ci dispose d'un empattement pour être maintenu contre le plateau avec les pieds de l'opérateur.
- Entonnoir, en matériau non absorbant et non directement attaqué par la pâte de ciment, ayant un collier permettant à l'entonnoir d'être placé correctement sur le cône d'Abrams spécifié ci-dessus.
- Mètre de 90cm.
- Seau d'une capacité minimale de 10 litres et muni d'un bec verseur.
- Truelle.
- Chiffon humide.
- Minuterie ou horloge capable de mesurer à 1 s près.
- Niveau.



Figure B-1 : Matériels nécessaires pour l'essai d'étalement.

B-1-3 Mode opératoire :

- Mettre le plateau sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque ainsi que le cône d'Abrams.
- Placer le cône au centre du plateau.
- Prélever un échantillon représentatif du béton.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir.
- Remplir le cône en déversant le béton de manière continue jusqu'à l'arase supérieure du cône.

- Retirer l'entonnoir et araser si nécessaire avec une truelle et nettoyer la plaque avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.
- Une fois le béton étalé, mesurer (au centimètre le plus proche) le diamètre final sur deux cotés perpendiculaires.
- Si les deux valeurs sont différentes de plus de 5cm, l'essai est invalide et reconduit.
- Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenues, en arrondissant au centimètre supérieur.
- On peut également chronométrer la valeur du T50 (temps nécessaire après soulèvement du cône pour que le béton atteigne le cercle de 50 cm), qui nous donne une idée sur la vitesse d'étalement, peut aussi nous renseigner sur la viscosité, l'ouvrabilité du béton est d'autant plus grande que la vitesse d'étalement est élevée..

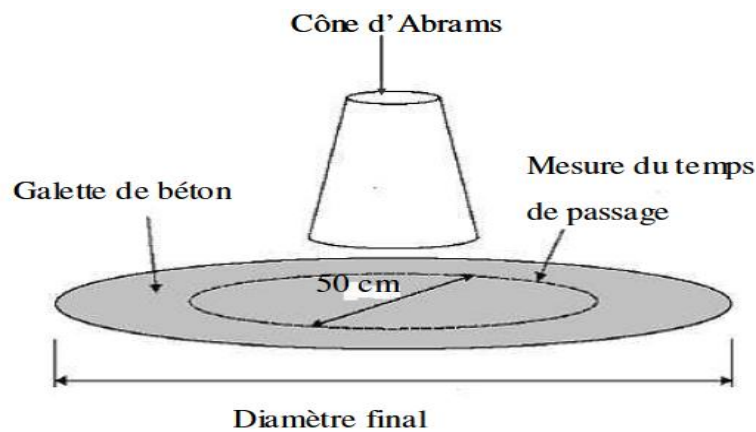


Figure B-2 : Mesure de l'étalement et T₅₀₀.

B-2 Essai de stabilité au tamis:

B-2-1 Objet de l'essai :

Qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation.

B-2-2 Matériels nécessaires :

- Seau de 10 litres + couvercle,
- Tamis 5mm diamètre 315mm + fond de tamis
- Balance : précision minimale 20g, portée minimale 20kg.



Figure B-3 : Matériels nécessaire pour l'essai de stabilité au tamis.

B-2-3 Mode opératoire :

- Echantillonnage : malaxer, verser directement 10 litres de béton dans le seau.
- Le temps d'attente entre l'arrêt du malaxeur et le prélèvement < 30 secondes.
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation.
- Attendre 15 minutes.
- Peser le fond seul (P_{fond}).
- Poser le (tamis + fond).
- Peser le fond et le tamis à vide.
- Faire la tare.
- Verser au centre du tamis un poids de béton égal à $(4,8 \text{ kg} \pm 0,2 \text{ kg})$, hauteur de chute du béton $(50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm})$.
- Attendre 2 minutes.
- Retirer le tamis ainsi que le fond et Faire la tare.
- Peser le fond avec la laitance : $P_{\text{laitance}} = (P_{\text{(fond + laitance)}} - P_{\text{fond}})$.
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$\text{Stabilité (\%)} = (P_{\text{laitance}} \times 100) / P_{\text{échantillon}}$$

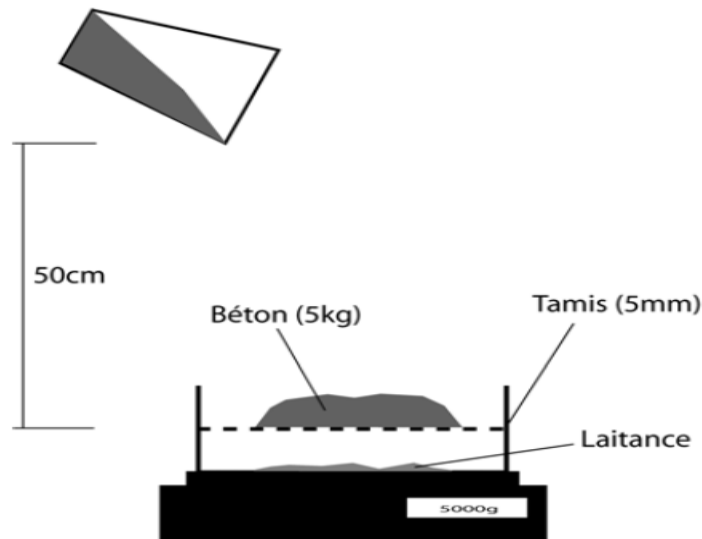


Figure B-4: Essai de stabilité au tamis.

B-3 Essai de la boîte en L (Capacité de remplissage):**1-3-1 Objet de l'essai :**

Tester la mobilité du béton en milieu confiné et vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes du phénomène de blocage inacceptables.

B-3-2 Matériels nécessaires :

- La boîte en L.
- Chiffon humide.
- Mètre de 90cm.
- Seau d'une capacité minimale de 10 litres et muni d'un bec verseur.

- Truelle.

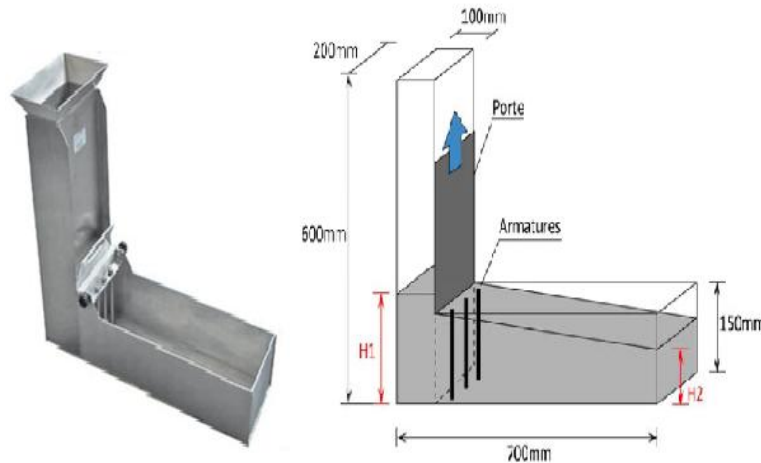


Figure B-5 : Essai de la boîte en L.

B-3-3 Mode opératoire :

- Humidifier l'intérieur de la boîte.
- Fermer la trappe métallique et vérifier que la boîte est sur un plan horizontal.
- Remplir de béton la partie verticale de la boîte en L (Son volume est d'environ 13 litres).
- Araser et laisser le béton reposer pendant 1 minute.
- Enlever la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39mm.
- Mesurer les hauteurs H1 et H2 Quand le béton ne s'écoule plus.
- Exprimer le rapport $H2/H1$.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe de blocage ou de ségrégation.

B-4 Essai d'entonnoir (V-Funnel) :

B-4-1 Objet de l'essai :

Mesurer le temps d'écoulement.

B-4-2 Matériels nécessaires :

- Le V-funnel.
- Mètre de 90cm.
- Seau d'une capacité minimale de 10 litres et muni d'un bec verseur.
- Truelle.
- Chiffon humide.
- Minuterie ou horloge capable de mesurer à 1 s près.

B-4-3 Mode opératoire :

- Humidifie l'intérieur du V-funnel.
- Remplir l'entonnoir dont les dimensions sont définies à la (figure B-6) en béton jusqu'en haut.
- Ouvrir le clapet de fermeture située à la base de V-Funnel.
- Mesurer le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé.

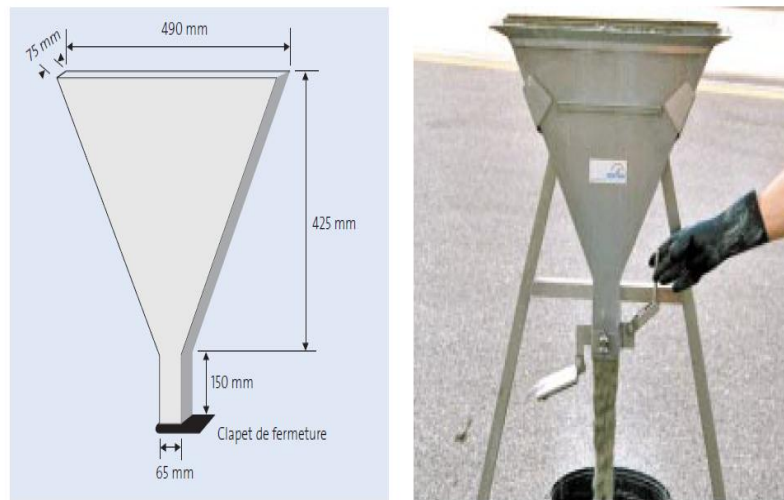


Figure B-6: Essai d'entonnoir utilisé pour mesurer le temps d'écoulement du béton.

C-1 La résistance mécanique à la compression :

Cet essai permet de déterminer la résistance à la compression du béton.

C-1-1 Principe de l'essai :

- L'éprouvette cylindrique 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.

C-1-2 Appareillage :

- Une machine de type «CONTROLS» à double quadrant, ayant une capacité maximale de 3000 KN.
- Dispositif pour rectifier les extrémités des éprouvettes.
- Balance (erreur relative < 0,1 %) pour déterminer la masse de l'éprouvette.

C-1-3 Mode opératoire :

- Placer l'éprouvette cylindrique sur la machine d'essai avec une erreur de positionnement inférieure à 1 % de son diamètre. Pour s'affranchir de mesures fastidieuses,
- Soumettre l'éprouvette cylindrique (16x32) cm² du béton à l'écrasement par compression axiale (figure C1). La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette avec une vitesse de chargement doit être constante et égale à 0,5 MPa/s ± 0,2 MPa/s.

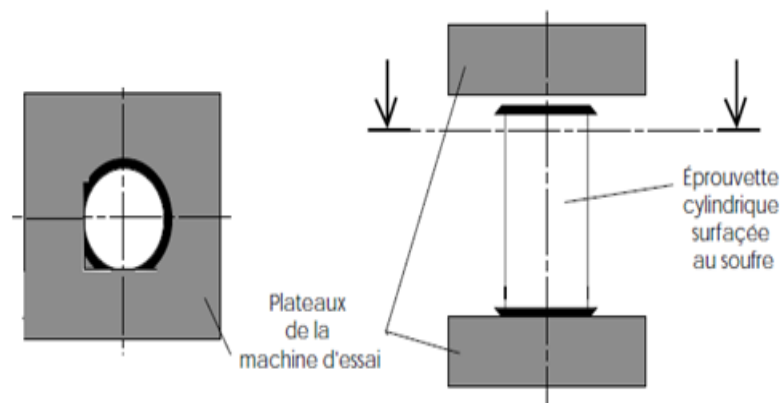


Figure C-1: Mise en place de l'éprouvette

On note la charge maximale atteinte P (KN) et la surface de chargement S (m²), la contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors :

$$\sigma_c = \frac{P}{S} \dots \dots \dots (\text{MPa})$$

P : charge de rupture,

S : surface de chargement, $[S = \frac{\pi.D^2}{4}]$ / D:diamètre de l'éprouvette cylindrique =16 cm,

σ_c : résistance à la compression.

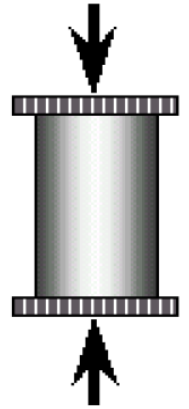


Figure C-2: Essai de compression axiale



Figure C-3 : Machine d'écrasement

C-2 résistance mécanique à la traction/flexion :

Cet essai permet de déterminer la résistance en flexion du béton, il est réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 7x7x28 cm.

C-2-1 Principe de l'essai

L'éprouvette prismatique est soumise à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance à la flexion calculée (figure).

C-2-2 Appareillage

- Une machine de type «CONTROLS», ayant une capacité maximale de 3000 KN.
- Dispositif de chargement équipé de 2 rouleaux d'appui et 1 rouleau supérieur reposant sur un support articulé pour la transmission de la charge
- Balance (erreur relative < 0,1 %) pour déterminer de la masse de l'éprouvette.

C-2-3 Mode opératoire

- Placer l'éprouvette prismatique dans la machine de flexion à l'aide d'un dispositif de flexion 3 points en prenant comme faces de chargement ses faces de moulage (la face d'arasement ne doit pas être en contact avec les rouleaux). Le positionnement doit être effectué à 1 mm près.
- soumettre l'éprouvette à une charge croissante P (KN) jusqu'à sa rupture avec une vitesse de chargement constante égale à 0,05 MPa/s \pm 0,01 MPa/s

Le moment de flexion constant est égale :

$$M = \frac{P \cdot a}{2} \dots \dots \dots (\text{KN.m})$$

M : Moment de flexion,

P : Force appliquée,

a : Cote de la section, (a= 7 cm).

Le croquis suivant décrit le dispositif de chargement destiné à l'essai de traction par flexion.

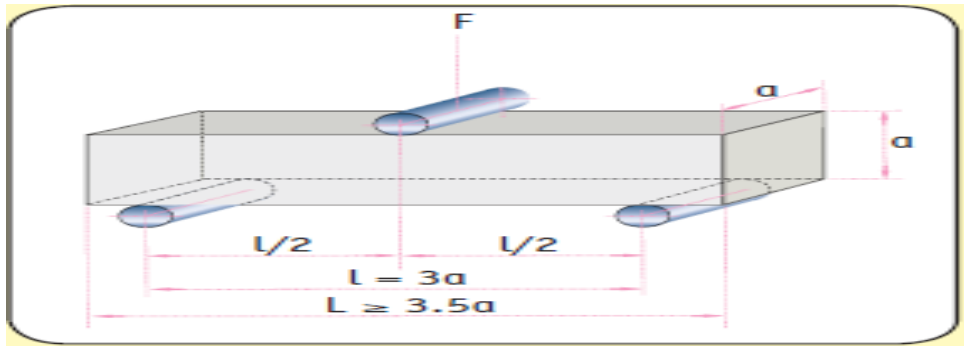


Figure C-4: Dispositif de chargement destiné à l'essai de traction par flexion (3 points).



Figure C-6: Machine et dispositif de l'essai de traction par flexion.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [**A. El Hilali, 2009**], Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) : influence des fines calcaires et des fibres végétales, Thèse de Doctorat en Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 17 Décembre 2009. p38-50
- [**A. Kamen, 2007**], Comportement au jeune âge et différé d'un BFUP écrouissant sous les effets thermomécaniques, Thèse de Doctorat ÈS Sciences de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 28 Juin 2007. p30-31-33
- [**A. Makani, 2011**], "Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique différé des bétons", Thèse de Doctorat en Génie Civil de l'université de Toulouse, 11 Juillet 2011. p36
- [**A. Muttoni, M.F.Ruiz, N. Kostic, 2006**], Support de Cours, "Effets différés" de "Prof. Dr Aurelio Muttoni, Dr. M. Fernández Ruiz, Assistant : N. Kostic", Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006. p4.
- [**A. Boudchicha, 2011**] Action des additions et superplastifiants sur les mortiers et bétons, Etude des propriétés rhéologique et mécanique, éditions universitaires européennes, 2011.
- [**A.Chabane, 2008**], "Comportement différé des variétés de bétons « mise en place d'un Bâti de Fluage »", Thèse de Doctorats en science en Génie Civil, Option : Structures / Matériaux , Université Mentouri Constantine, 27 Janvier 2008.
- [**A.Chabane, 2012**], "Comportement mécanique et différé des bétons", Cours de Magister (2011- 2012).
- [**A. M. NEVILLE, 1983**], "Properties of concrete", editions J. Wiley and Sons, p. 398- 405,
- [**ACI 209R-92, (Reapproved 1997)**, American Concrete Institute Committee "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures" Reported by ACI Committee 209, 1992.
- [**ACI209. 2R, 08**], American Concrete Institute Committee, "Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened concrete." The American Concrete Institute. ACI Committee 209, 2008, pp. 1-44.
- [**AFGC 2000**] Association Française de Génie Civil, « Bétons autoplaçants - Recommandations provisoires », Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000.
- [**B. Parmentier, V. Pollet , G. Zarmati, 2009**], "Le retrait empêché du béton Prédiction selon l'Eurocode 2 et maîtrise via les techniques d'exécution", Les Dossiers du CSTC – N° 2/2009 – Cahier n° 3 – page 12
- [**C. De sa, 2007**], "Etude hydro-mécanique et thermo-mécanique du béton influence des gradients et des incompatibilités de déformation ", Thèse de Doctorat en Génie Civil de l'école normale supérieure de Cachan, 17 Décembre 2007. p15-17-31
- [**C.Defossé, 2004**], "Chimie du ciment valorisation des déchets en cimenterie", Cours du professeur <Camille Defossé> de l'Université libre de Bruxelles, 2004, p25-35.
- [**CEB-FIP, 1993**] CEB-FIP Model Code 1990, Design Code, Euro-international Concrete Committee, Lausanne, 1993.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[**CH. Clarke,2009**], "Concrete shrinkage prediction using maturity and activation energy", Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science,2009 p27-32-39

[**CH.Peng,2009**], "Apports de l'Analyse microtomographique dans la modélisation des effets du séchage des matériaux à matrice cimentaire", Thèse de Doctorat en Génie Civil de l'Université Lille1 Sciences et Technologies, 16 Décembre 2009. p07-10

[**Dr. Ir. P. Boeraeve, 2010**] Cours de Béton armé, 2010

[**E. Mbemba, 2005**], "Comportement des bétons au très jeune âge", Thèse de l'Ecole Doctorale MTGC Centrale Nantes,12 Mai 2009, p10-25

[**E. Tazawa, S. Miyazawa, and T. Kasai, 1995**], "Chemical Shrinkage and autogenous Shrinkage of hydrating Cement Paste", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No 2, pp.288-292.

[**E.Proust, 2002**], "Retrait et fluage des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés, Thèse du doctorat INSA, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE, 2002.

[**E.S David Mucambe, 2010**], "Creep and Shrinkage Prediction Models for Concrete water Retaining Structures in South Africa",2010, p66

[**EK.Zden ,P. Bazant, S. Baweja,1995**], "Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3", Structural Engineering Report 94-10/603c, Northwestern University, (1994); Published as draft RILEM recommendation in Materials and Structures (RILEM Paris), 28 (1995), 357-365, 415-430, 488-495. p3-10-11

[**F. Benboudjema,2002**], "Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires", Thèse Doctorat en Génie Civil, spécialité structures, Université de marne la vallée, 19 Décembre 2002.p16-30-37.

[**F. Hanaa, 2009**], Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposées à une température élevée, Thèse du Doctorat en Génie Civil de l'Université de Cergy-Pontoise,07 Décembre 2009.p16-17-23-24.

[**G.Benkechache, 2007**], Etude du comportement différé du béton autoplaçant, influence de paramètres de composition et de chargement, Thèse de Magister en Génie Civil, option Mécanique des structures, Université Mentouri Constantine, Novembre 2007.

[**G.Benkechache,2012**], "Contribution a l'étude des mécanismes liés au retrait et fluage (déformations différées) des bétons, Thèse de Doctorats en Génie Civil, option Mécanique des structures, Université Mentouri Constantine, Avril 2012.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[**H.OKAMURA and M.OUCHI, 1999**], "Self-compacting concrete. Development, present and future", Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 3-14, 13-15 septembre 1999.

[**H.Zahouani et A.Touaiti, 2011**], Elaboration d'un béton autoplaçant a base du laitier de haut fourneau, Thèse de master en Génie Civil option : C.C.I, Université KASDI MERBAH OUARGLA, p6

[**Holcim,2004**] :Guide pratique, Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables, une publication de Holcim (Belgique), S.A,2004

[**I. Jaouadi,2008**], "Etude numérique et expérimentale du retrait endogène de la pâte de ciment au jeune âge", Thèse de Doctorat en Génie Civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 03 Octobre 2008. p 15-27-28

[**I. YURTDAS, 2003**], " Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux a matrice cimentaire : Etude expérimentale sur mortiers", Thèse de Doctorat en Génie Civil de l'Université des sciences et technologies de Lille ,02 Octobre 2003

[**I.Guénot-Delahai, 2010**], "Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton", Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), Spécialité Structure et Matériaux, 04 Octobre 2010. p10-11-20

[**I.Guénot-Delahaie, 2010**], "Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton", Thèse de doctorat en Génie Civil de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Spécialité : Structures et Matériaux, 04 Octobre 2010. p10-15-16-20

[**I.Jaouadi, 2008**], "Etude numérique et expérimentale du retrait endogène de la pâte de ciment au jeune âge", Thèse de Doctorat en Génie Civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 03 Octobre 2008.

[**Ir c. Ployaert, 2010**], "Limiter la fissuration :Condition indispensable à la durabilité des bétons", Bulletin publiée par Fédération de l'industrie cimentière Bruxelles, Novembre 2010,p04

[**J. Monge, 2007**], "Fissuration des Mortiers en Couches Minces - Effets de l'Hydratation, du Séchage et de la Carbonatation ", Thèse de Doctorat en Génie Civil de l'Ecole normale supérieure de Cachan, 20 décembre 2007. p19-20

[**J. Zreiki, 2009**], "Comportement du béton au jeune âge dans les structures massives. Application au cas de réparation des ouvrages", Thèse de Doctorats en Génie Civil de l'école normale supérieure de Cachan (ENSC), 25 septembre 2009 p37.

[**J.Baron, JP.Ilivier, 1996**], "Les bétons – Bases et données pour leur formulation", Editions Eyrolles, 1996.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[**J.Ping Lam, 2002**], "Evaluation of concrete shrinkage and creep prediction models", Master's Theses and Graduate Research, San Jose State University SJSU Scholar Works, 2002, p10

[**J-C.Braquenier et J.Desnyter, 2000**] Le béton autoplaçant ou autocompactant,

[**K.H.Khayat, 1996**] « Colloques sur les bétons autonivelants » Centre de Recherche Interuniversitaire sur le béton (CRIB) Université de SHERBROOKE, Université LAVAL Québec 1er Novembre 1996

[**L.Bal, 2009**], Modélisation du retrait et du fluage du béton par réseaux de neurones, Thèse de Doctorat en Génie Civil, spécialité structures, Université des Sciences et Technologies de Lille, p24-46,15 Décembre 2009.

[**L.Granger, 2010**], "Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires : analyse et modélisation", Thèse de Doctorat en Génie Civil de l'Ecole nationale des ponts et chaussées (ENPC), Spécialité Structure et Matériaux, 24 Septembre 2010. p94-97

[**M. Briffaut, 2010**], " Etude de la fissuration au jeune âge des structures massives en béton: influence de la vitesse de refroidissement, des reprises de bétonnage et des armatures", Thèse de Doctorat en Génie Civil de l'Ecole normale supérieure de Cachan, 22 Octobre 2010 , p76

[**M. Venuat ,1992**], « La Pratique des Ciments et des Bétons », Editions du Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment, Janvier 1992.

[**M.Benia, 2006**], "Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux", Thèse de Magister en Génie Civil, option: Matériaux, Université Mohamed Boudiaf de M'sila. 2006, p10.

[**M.Bourissai, 2010**], "Comportement thermo-chimio-hydro-mécanique d'un ciment pétrolier au très jeune âge en conditions de prise HP/HT. Approche expérimentale et analyse par changement d'échelle". Thèse de Doctorat de l'université de Paris-Est, 10 Juin 2010.p30-33.

[**M.El barrak, 2005**], Contribution a l'étude de l'aptitude a l'écoulement des bétons autoplaçants a l'état frais Thèse de Doctorat, spécialité Génie Civil Université Toulouse III – Paul Sabatier Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions INSA/UPS – génie civil , 12 juillet 2005.

[**M.I. khalifa, 2009**] , "Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants" ,Thèse de doctorat en Génie Civil de l'université de constantine, 20 juin 2009.p28-29-30.

[**N. BOUHAMOU, 2008**] « Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais » Article dans « Afrique science » du 04/01/2008.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[**N. Bouhamou, N. Belas, H. Mesbah, R. Jauberthie, A. Ouali et A. Mebrouki, 2013**] Influence des rapports eau/ciment et fines/ciment sur le comportement à l'état durci du béton autoplaçant à base de matériaux locaux algériens. by Nanjing University of Posts and Telecommunications on 06/06/13

[**N. REVIRON, 2009**], "Etude du fluage des bétons en traction. Application aux enceintes de confinement des centrales nucléaires à eau sous pression.", Thèse de Doctorats en Génie Civil de l'école normale supérieure de Cachan (ENSC), 09 Mars 2009.

[**N.Hyvert, 2009**], " Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton", Thèse du Doctorat de l'université de Toulouse, 10 Avril 2009.p 21-23.

[**N.Rebbouh ,2006**], Formulation et caractérisation d'un béton autoplaçant, Projet de fin d'étude de l'école nationale polytechnique, Alger P08-40.

[**N.Tabet, 2012**], Contribution à l'étude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur le comportement physico- mécanique des bétons autoplaçants fibres (BAPF), Thèse de Magister en Génie Civil, Université m'hamed bougara-boumerdes. p5-66

[**Neville, 2000**] **NEVILLLE A. M.**, " Propriétés des Bétons ", traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles 2000.

[**NF P 18-406**] **NORME FRANÇAISE NF P 18-406**, « Bétons – Essais de compression », AFNOR, décembre 1981.

[**P.ACKER & Ulm, 2001**], Micromechanical analysis of creep and shrinkage mechanisms, concreep MIT, Boston 2001.

[**P.Diederich, 2010**], "Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton", Thèse du Doctorat en Génie Civil de l'université de Toulouse, 17 Décembre 2010. p 21- 34-42.

[**Ph.Turcry, 2004**], "Retrait et fissuration des bétons autoplaçants influence de la formulation", Thèse de Doctorat en Génie Civil de l'Université de Nantes, 03 Février 2004. p36.

[**R. Missouri, 2012**] "Self-Consolidating Concrete (SCC) for Infrastructure Elements: Creep, Shrinkage and Abrasion Resistance", Missouri University of Science and Technology, Rolla, Missouri, July 2012. p18-19

[**Rapport d'activités 2004**], Centre scientifique et technique de la construction.

[**S. STAQUET, 2004**], "analyse et modélisation du comportement différé du béton, application aux poutres mixtes, préfléchies et précontraintes, Volume 1, Thèse de Doctorat en Génie Civil de l' Université libre de Bruxelles, 1 Septembre 2004.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[S.Assié, 2004], Durabilité des bétons autoplaçants, Thèse de Doctorat INSA, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE. p18-19-21-22-23-24-29.

[S.Bellifa, 2012], "Evolution de la porometrie des pates autoplaçants", Thèse de Magister en Génie Civil, option Matériau Béton de l'Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen ,15 Mars 2012. p24-32

[S.Bethmont,2005], "Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP), étude expérimentale des interactions granulaires", Thèse de doctorat en Génie Civil de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 15 Décembre 2005.

[S.Brahim] : Support de cours de matériaux de construction, Chapitre 2: Methode de formulation des bétons autoplaçants.

[T.Rougelot, 2008], "Etude expérimentale multi-échelles des couplages hydriques, mécaniques et chimiques dans les matériaux cimentaires", Thèse de Doctorat en Génie Civil de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 09 Décembre 2008. p18.

[T.SEDRAN, 1999], Rhéologie et rhéomètre des bétons. Application aux bétons autonivelant, Thèse de doctorat de L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES.

[V. Seigneur,2000] , "Etude de l'influence du mûrissement à l'eau et de l'ajout d'un agent réducteur de retrait sur le retrait endogène des bétons à haute performance" Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées Spécialité : génie civil Septembre 2000. p1-12-14-18-31.

[W. Ladaoui, 2010], "Etude expérimentale du comportement Thermo-Hydro Mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs", Thèse de Doctorat en Génie Civil de l'Université de Toulouse III - Paul Sabatier, 09 Décembre 2010. p46

[wikipédia] Site web: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Fluage>

[Y.BOUCHENEB, 2011], Retrait plastique des bétons autoplaçants, Thèse de Magister en Génie Civil, Option : Structures et Matériaux Université Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou, 08 Décembre 2011.