



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMCCEN
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

SPECIALITE : GENIE CIVIL

OPTION : INFRASTRUCTURE DE BASE ET GEOTECHNIQUE

Thème:

ETUDE DU RETRAIT DES BETONS AUTOPLAÇANTS

Présenté par :

BRIXI NEZHA KHADOUJJA

Soutenu le 24/06/2014 devant le jury composé de

M ^r	A.	BAGHLI	MA	Univ. Tlemcen	Président
M ^r	A.	BEZZAR	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur
M ^r	N.	HASSAINE	MA	Univ. Tlemcen	Examineur
M ^r	M.A.	BOUKLI HACENE	MCA	Univ. Tlemcen	Encadreur
M ^r	O.	TALEB	MA	Univ. Tlemcen	Encadreur

REMERCIEMENTS

Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et d'achever ce mémoire.

Mes premiers remerciements vont au Professeur GHOMARI Fouad, qui m'a accueilli au sein de son laboratoire EOLE, qui m'a enseigné tout au long des années de ma spécialité en Génie Civil. Ses connaissances, ses conseils, m'ont beaucoup aidé à bien mener ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de mes sincères gratitude.

J'aimerais exprimer ma profonde gratitude au Docteur BOUKLI HACENE Mohammed Amine, qui ma fait confiance en acceptant de m'encadrer. Je lui en suis très reconnaissante de l'opportunité qu'il ma offert pour préparer ce travail.

Je tiens également à manifester toute ma reconnaissance à mon encadreur, Monsieur TALEB Omar, pour son aide si précieuse, sa disponibilité et sa confiance durant tous ces mois de travail. Qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect.

Mes vifs remerciements s'adressent, A Monsieur BAGHLI A, d'avoir accepté de présider le jury de ce travail.

J'adresse ma profonde gratitude au Docteur BEZZAR A, & à Monsieur HASSAINE N, de bien vouloir accepter d'examiner ce présent mémoire.

Mes sincères remerciements sont aussi adressés envers mes collègues pour le temps agréable et l'ambiance exemplaire que nous avons passés ensemble.

Enfin, toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à l'entreprise SOGERWHIT et en particulier à Messieurs BELAROUCI Abdelghani, HENAOUI Mustapha, MERIOUA Abderrahmène, BENALI Yacine & AZIEZ Nadjib.

RESUME

Grâce à des progrès scientifiques, ces dernières années ont vu une révolution dans le domaine du béton, avec l'apparition de bétons plus résistants, plus durables, ainsi que des bétons plus fluides appelés auto – plaçants (BAP) qui améliorent d'ailleurs considérablement l'esthétique et la mise en place.

En plus, des mortiers autoplaçants dérivés des BAP ont aussi connu un véritable succès, au cours de cette dernière décennie, puisqu'ils sont souvent confectionnés pour la réalisation des chapes.

Par ailleurs, le volume d'un élément en béton ou en mortier diminue au cours du temps. Ce phénomène connu sous l'appellation du retrait est dû à l'hydratation du ciment et au séchage. En plus, si ce retrait est gêné ou empêché ou le béton est exposé à des températures élevées, ce dernier sera soumis à des efforts de traction, qui le place dans une situation de fissuration précoce.

Dans notre étude, nous avons d'abord formulé des bétons autoplaçants (BAP) et des mortiers dérivés (MBE, MBAP et MT) sur lesquels nous avons réalisé des essais rhéologiques.

Afin de justifier l'emploi de ces mortiers à caractère autoplaçant dans la confection de chapes, nous nous sommes concentrés sur leurs comportements vis-à-vis du retrait plastique, endogène et total. Nous avons aussi jugé utile d'étudier l'influence de trois températures (20°C, 40°C et 50°C) sur le retrait plastique.

Mots clés : Retrait, fissuration, Bétons Autoplaçants, mortier, seuil de cisaillement, viscosité, additions minérales, superplastifiants.

ABSTRACT

Thanks to scientific advances, the recent years have seen a revolution in the field of concrete, with the emergence of more resistant concrete, more sustainable and more fluid concretes called Self Compacting Concrete (SCC) which greatly improves the esthetic and the setting up.

In addition, the self compacting mortars derived from the SCC have also been highly successful during the last decade; they are often made to realize screeds.

Furthermore, the volume of an element of concrete or mortar decreases over the time, this phenomenon known as shrinkage was due to hydration of the cement and drying.

In addition, if the shrinkage is hindered, prevented or exposed to high temperatures, the concrete is subjected to tensile efforts, which place it in a situation of early cracking.

In our study, we first made the self-consolidating concrete (SCC) and mortar derivatives (MEC, MSCC, MT) on which we performed rheological tests.

To justify the use of these compacting mortars in marking screeds, we focused on their behavior overlooked plastic shrinkage, endogenous and total shrinkage. We also found that it is useful to study the influence of three temperatures (20°, 40° and 50°) on plastic shrinkage.

Keywords: Shrinkage, cracking, self compacting concretes, mortar, yield stress, viscosity, mineral admixtures, superplasticizers.

المخلص

إنّ التقدم العلمي المشهود في السنوات الأخيرة في مجال الخرسانة، جعلها تصبح أكثر مقاومة، أكثر استدامة و أكثر مرونة بالإضافة إلى الخرسانة السائلة أو بالاحرا ذاتية الرص التي على غرار باقي أنواع الخرسانة تتميز بسهولة التنفيذ و جماليات المظهر.

بالإضافة إلى هذا، عرفت المشتقات الخرسانة المائعة نجاحا كبيرا خلال العقد الماضي خاصة في انجاز الأسقف. لكن حجمها يتقلص بمرور الوقت ويرجع ذلك إلى ترطيب الاسمنت و تجفيفه, هذه الظاهرة المعروفة باسم التقلص أو الانكماش الذي إذا تم عرفلته أو منعه أو تعرضه لدرجات حرارة عالية، يؤدي الخرسانة إلى ضغط شديد، الأمر الذي يضعها في حالة من الانشقاق في وقت مبكر من حياتها.

في دراستنا، نتطرق في البداية إلى طرق صياغة و تصميم الخلطات الخرسانية السائلة و الملاط المشتقة منها لتبرير استخدام هذه المشتقات المائعة، ركزنا على سلوكها من حيث التقلص البلاستيكي, الذاتي و الكامل. كما ارتأينا إلى دراسة تأثير ثلاثة درجات الحرارة (20 درجة و 40 درجة و 50 درجة) على التقلص البلاستيكي.

كلمات البحث :

تقلص ، تشقق ، الخرسانة الذاتية الرص، الملاط ، عتبة القص، اللزوجة، المضافات المعدنية، الملدن الفائق.

SOMMAIRE

Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xiv
Principales notations.....	xv
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : RHEOLOGIE DES BETONS AUTOPLAÇANTS ET DES MORTIERS ASSOCIE...3	
I. INTRODUCTION :	4
II. METHODES DE FORMULATION DES BAP:	4
II.1 Méthode basée sur l’optimisation du mortier :	4
II.1.1 Dosage des gravillons :	5
II.1.2 Dosage du sable:	5
II.1.3 Dosage du liant :	5
II.1.4 Dosage de l'eau et du superplastifiant :	6
II.2 Méthode basée sur l’optimisation de la compacité des mélanges granulaires :.....	7
II.3 Méthode de formulation Chinoise :	8
II.3.1 Calcul du dosage des granulats :	9
II.3.2 Calcul du dosage de ciment:	9
II.3.3 Calcul du dosage en eau:	10
II.3.4 Calcul du volume des additions:	10
II.3.5 Calcul de la teneur en eau total :	11
II.3.6 Calcul du dosage en superplastifiant:	11
II.4 Bilan :	12
III. ETUDE RHEOLOGIQUE:	13
III.1 Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP :	13
III.2 Principe de fonctionnement du rhéomètre :	15
III.3 Description de l'appareil :	15
III.3.1 L'agitateur:	16
III.3.2 La pôle:	16
III.3.3 Le récipient:	16
III.4 Procédure d'essai :	17
III.5 Caractérisation des BAP à l'état frais :	17
III.5.1 Essai d'étalement :	18

III.5.2 Essai à la boîte en L:	18
III.5.3 Essai de stabilité au tamis:	19
III.6 Etude rhéologique sur les mortiers :.....	20
III.6.1 Mortier des Bétons Equivalents :.....	20
III.6.1.1 Principe de la méthode du Mortier des Bétons Equivalents(MBE) :.....	21
III.6.1.2 Calcul de la composition du Mortier des Bétons Equivalents(MBE) :.....	23
III.6.2 Mortiers Thermiquement équivalents(MT) :.....	25
III.6.3 Mortiers classiques du Béton(MB) :.....	26
III.6.4 Essais d'évaluation du comportement rhéologique des mortiers :.....	27
III.6.4.1 Essais d'affaissement au mini-cône :.....	27
III.6.4.2 Essais d'étalement au mini-cône pour les mortiers fluide(MBAP) :.....	27
III.7 Etude Rhéologique multi-échelle :.....	28
III.8 Bilan :.....	28
IV. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 1 :	29
CHAPITRE 2 : MECANISMES ET CARACTERISATION DU RETRAIT.....	32
I. INTRODUCTION :	33
II. LES FORMES DE RETRAIT :.....	34
II.1 Retrait au très jeune âge (retrait chimique) :	34
II.2 Retrait endogène (d'autodessiccation) :.....	35
II.3 Retrait thermique :	36
II.4 Retrait de dessiccation (séchage):.....	37
II.5 Retrait de carbonatation :.....	37
III. MECANISMES A L'ORIGINE DU RETRAIT PLASTIQUE :.....	38
III.1 Le tassement :.....	38
III.2 Retrait de séchage :	39
III.3 Retrait d'autodessiccation :.....	40
III.3.1 Le retrait par variation de la dépression capillaire :.....	41
III.3.2 Le retrait par variation de la tension superficielle du solide :.....	42
III.3.3 Le retrait par variation de la pression disjonctive :.....	42
IV.PARAMETRES AFFECTANT LE RETRAIT :	43
V. INFLUENCE DE LA FORMULATION SUR LE RETRAIT :	43
V.1 Effet du rapport E/C :.....	43
V.2 Effet du volume de la pâte :.....	44

V.3 Effet de la masse de ciment ou des fines :.....	45
V.4 Effet des additions :.....	45
V.5 Effet des adjuvants :.....	46
V.6 Effet de la concentration granulaire :.....	46
VI. MESURES DU RETRAIT PLASTIQUE :.....	47
VI.1 Mesures linéiques :.....	48
VI.2 Mesures volumiques :.....	52
VI.2.1 Le suivi du niveau du liquide d'immersion :.....	52
VI.2.2 La pesée hydrostatique :.....	53
VII. ETUDE DE LA FISSURATION A L'ETAT FRAIS :.....	53
VII.1 Dispositif de fissuration pour béton :.....	53
VII.2 Dispositif de fissuration pour mortier :.....	54
VIII. MESURE DE L'EVAPORATION :.....	56
IX. ESSAIS PHYSICO-MECANQUES SUR DES MORTIERS DES BETONS AUTO- PLAÇANTS :.....	56
IX.1 Essais physiques :.....	56
IX.1.1 Perte en Poids :.....	56
IX.1.2 Pesée Hydrostatique :.....	57
IX.2 Essais mécaniques :.....	57
X. BILAN :.....	58
XI .REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 2 :	59
CHAPITRE 3: CARACTERISATION DES MATERIAUX.....	63
I. CARACTERISATION DES GRANULATS :.....	64
I.1 Granularité :.....	65
I.2 Masses volumiques:.....	66
I.3 Propreté des granulats:.....	66
I.3.1 Propreté des graviers :.....	66
I.3.2 Essai d'équivalent de sable :.....	66
I.4 Caractéristiques mécaniques:.....	67
I.4.1 Essai Micro-Deval :.....	67
I.4.2 Essai Los Angeles :.....	67
I.5 Coefficient d'absorption des granulats :.....	67
I.5.1 Graviers :.....	67

I.5.1 Sable :.....	68
II. CARACTERISATION DU CIMENT :.....	68
III.CARACTERISATION DES FILLERS CALCAIRES :.....	70
IV.CARACTERISATION DE LA POZZOLANE :.....	70
V. CARACTERISATION DE L'ADJUVANT:.....	71
V.1 Eau :.....	71
VI. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 3 :.....	72
CHAPITRE4 : ETUDE EXPERIMENTALE.....	73
I. FORMULATION DU BETON AUTOPLAÇANT :.....	74
I.1 Dosage en Liant « NF EN 206-1 »	74
I.2 Dosage en eau :	74
I.3 Essai au mini cône (NF EN 196-1) :	75
I.4 Détermination du dosage de saturation en superplastifiant :.....	76
I.5 Compacité des granulats :.....	76
I.6 Dosage en granulats :	78
II. FORMULATION DES MORTIERS :.....	79
II.1 Formulation des Mortiers de Bétons Equivalents (MBE) :.....	79
II.2 Formulation des Mortiers de Bétons Autoplaçants (MBAP) :.....	80
II.3 Formulation des Mortiers Thermiquement équivalents (MT) :	80
II.4 Comparaison massique entre le BAP et les mortiers associés :.....	81
II.5 Malaxage :.....	81
II.6 Mesures au mini-cône :.....	82
II.7 Confection des éprouvettes prismatiques :.....	82
III.ETUDE RHEOLOGIQUE	83
VI.ETUDE DES DEFORMATIONS INSTANTANÉES :.....	86
VI.1 Retraits endogène et total :.....	86
VI.2 Perte de masse :.....	88
VI.3 Retraits plastique et empêché :.....	88
VI.4 Evaporation :	89
VI.5 Résistance à la compression et à la flexion :.....	89
V.RESULTATS ET INTERPRETATIONS :.....	90
V.1 Etude rhéologique sur les différents types de mortiers :.....	90
V.2 Retrait des Mortiers de Bétons Equivalents :.....	92

V.2.1 Cas des fillers calcaires :.....	92
V.2.2 Cas de la pouzzolane :.....	94
V.3 Retrait des Mortiers des Bétons Autoplaçants :.....	95
V.4 Retrait des Mortiers Thermiquement Equivalents :.....	96
VI.ETUDE DU RETRAIT PLASTIQUE :.....	98
VII.CORRELATION ENTRE LA PERTE DE MASSE ET LE RETRAIT:.....	102
VIII.ETUDE DES RESISTANCES MECANIQUES.....	103
IX. BILAN :.....	104
X.REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 4 :.....	106
CONCLUSION GENERALE ET PARSPECTIVES	107

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité.....	5
Figure 1.2 : Dimensions du cône et de l'entonnoir à mortier.....	6
Figure 1.3 : Exemple de recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif (R_m) en fonction de l'étalement relatif (Γ_m).....	7
Figure 1.4 : Types de rhéomètres.....	14
Figure 1.5 : Composants du rhéomètre	15
Figure 1.6 : Position de la pale dans le mortier.....	16
Figure 1.7 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	18
Figure 1.8 : Essai de la boîte en L.....	18
Figure 1.9 : L'essai de stabilité au tamis.....	19
Figure 1.10 : Formation d'hydrates à la surface des granulats.....	20
Figure 1.11 : Passage du béton au MBE.....	21
Figure 1.12 : Cône pour béton et pour mortier.....	22
Figure 1.13 : Corrélation linéaire entre affaissement au cône et étalement au mini-cône.....	23
Figure 1.14 : Passage du béton au mortier MT.....	25
Figure 1.15 : Passage du béton au mortier classique.....	26
Figure 2.1 : Définition du retrait plastique.....	34
Figure 2.2 : Mesure du retrait chimique	35
Figure 2.3 : (a) Ponts cristallins lors de la prise ; (b) : Localisation de fissure de retrait sur la coupe d'une éprouvette.....	36
Figure 2.4 : Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment.....	39
Figure 2.5 : Evolution théorique de la pression de l'eau dans une pâte de ciment.....	40
Figure 2.6 : Présentation schématique de la dépression capillaire.....	41
Figure 2.7 : Influence du rapport E/C sur la valeur du retrait.....	44
Figure 2.8 : Retrait plastique de bétons avec 4 fractions volumiques de patte différentes (de -30 à +10% par rapport à la composition de base)-cas d'un séchage forcé.....	45
Figure 2.9 : Influence de la cendre volante sur le retrait.....	46
Figure 2.10 : Rétractomètre pour la mesure linéique.....	48
Figure 2.11 : Dispositif expérimentale utilisé par Le Roy (1997) mesure linéique horizontale.....	49
Figure 2.12 : Dispositif de mesure de retrait linéique horizontal.....	50

Figure 2.13 : Coupe longitudinale de la manchette en PVC.....	50
Figure 2.14 : Vues de gauche et de dessus du dispositif de mesure de retrait horizontal.....	51
Figure 2.15 : Vues gauche et de face du dispositif de mesure de retrait vertical.....	51
Figure 2.16 : Mesure de retrait externe par variation de niveau de mercure.....	52
Figure 2.17 : Mesure de retrait externe automatisé.....	52
Figure 2.18 : Dispositif expérimental de mesure des variations volumiques.....	53
Figure 2.19 : Vue en coupe du dispositif de fissuration des bétons.....	53
Figure 2.20 : Dispositif de fissuration pour bétons.....	54
Figure 2.21 : Vue en coupe du dispositif de fissuration des mortiers.....	54
Figure 2.22 : Dispositif de fissuration pour mortier.....	54
Figure 2.23 : Calcul de l'aire totale d'une fissure.	55
Figure 2.24 : Vue d'ensemble d'un essai de retrait à l'anneau.....	55
Figure 2.25 : Mesure de l'évaporation.....	56
Figure 2.26 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.....	57
Figure 2.27 : Dispositif de rupture en compression.....	58
Figure 3.1 : Plan de situation du gisement de Djebel Abiod.....	64
Figure 3.2 : Courbes granulométriques des granulats.....	65
Figure 3.3 : La méthode utilisée pour la détermination du coefficient d'absorption du sable.....	68
Figure 4.1 : Etalement au mini-cône de la pâte de ciment et des fillers calcaires.....	75
Figure 4.2 : Etalement du rapport E/F.....	75
Figure 4.3 : Dosage de saturation en superplastifiant pour les coulis de ciment.....	76
Figure 4.4 : Dosage de saturation en superplastifiant pour les coulis de fillers calcaires.....	76
Figure 4.5 : Evolution de la masse volumique apparente avant et après compactage en fonction du rapport S/G+S.....	77
Figure 4.6 : la comparaison des constituants des différents mélanges.....	81
Figure 4.7 : Etalement des MBE, MBAP et MT au cône.....	82
Figure 4.8 : Moule 4x4x16 cm muni de plots.....	82
Figure 4.9 : Essai rhéologique sur mortier.....	83
Figure 4.10 l'allure de la vitesse imposée (rouge) et des couples de rotation nécessaires (bleu) pour un des mortiers étudiés.....	85
Figure 4.11 : Eprouvette enveloppée.....	87
Figure 4.12 : Eprouvette non enveloppée.....	87
Figure 4.13 : L'ensemble des éprouvettes confectionnées de différentes formulations.....	87

Figure 4.14 : Banc d'essai pour la mesure du retrait.....	88
Figure 4.15 : Vue en coupe du dispositif de fissuration des mortiers plein et vide.....	88
Figure 4.16 : Banc d'essai pour la mesure du taux d'évaporation.....	89
Figure 4.17 : Dispositif de compression.....	89
Figure 4.18 : Dispositif de flexion.....	89
Figure 4.19 : Etalement en fonction du rapport A/A+C.....	90
Figure 4.20 : Affaissement en fonction du rapport F/F+C.....	90
Figure 4.21 : Affaissement au mini cône.....	90
Figure 4.22 : le seuil de cisaillement en fonction du rapport A/A+C.....	91
Figure 4.23 : la viscosité en fonction du rapport A/A+C.....	91
Figure 4.24 : Le retrait endogène et total des MBE.....	92
Figure 4.25 : Retrait dessiccation des MBE.....	93
Figure 4.26 : Retrait total et endogène des MBE à base de la pouzzolane.....	94
Figure 4.27 : Retrait de dessiccation des MBE.....	95
Figure 4.28 : Retrait total et endogène des MBAP.....	96
Figure 4.29 : Retrait total et endogène des mortiers MT.....	97
Figure 4.30 : La longueur de la fissuration à 50°C des différents mortiers.....	98
Figure 4.31 : La longueur de la fissuration à 40°C des différents mortiers.....	98
Figure 4.32 : La largeur de la fissuration en fonction de la température des différents mortiers.....	99
Figure 4.33 : Le taux d'évaporation des MBAP, MBE et MT.....	99
Figure 4.34 : Les états de surfaces des différents mortiers selon la température d'exposition.....	101
Figure 4.35 : Photo microscopique de la largeur de fissuration du MBAP à 50°C.....	102
Figure 4.36 : Retrait endogène en fonction de la perte en masse.....	102
Figure 4.37 : Retrait total en fonction de la perte en masse.....	103
Figure 4.38 : Résistance à la compression des mortiers étudiés en fonction du taux de substitution	103
Figure 4.39 : Résistance à la flexion des mortiers étudiés en fonction du taux de substitution.....	104

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Constituants du BAP.....	12
Tableau 1.2: Exemples de différentes compositions utilisées en France	12
Tableau 1.3: Caractéristiques de l'agitateur.....	16
Tableau 1.4: Valeurs préconisées pour les essais AFGC.....	20
Tableau 3.1 : Composition chimique de la roche exploitée dans la carrière de Djebel Abiod.....	65
Tableau 3.2 : Récapitulatif des caractéristiques des matériaux.....	68
Tableau 3.3 : Propriétés chimiques du ciment.	69
Tableau 3.4 : Propriétés physico – mécaniques du ciment.....	69
Tableau 3.5 : Propriétés chimiques des fillers calcaires	70
Tableau 3.6 : L'analyse chimique de la pouzzolane.....	70
Tableau 3.7 : Caractéristiques du superplastifiant	71
Tableau 3.8 : Caractéristiques chimiques de l'eau.	71
Tableau 4.1 : Résultats des essais de compacité.	77
Tableau 4.2: Formulation du BAP de référence pour 1m ³	78
Tableau 4.3 : Formulation des MBE à différents pourcentages en fillers calcaires pour 1m ³	79
Tableau 4.4: Formulation des MBE à différents pourcentages en pouzzolane pour 1m ³	79
Tableau 4.5 : Formulation des MBAP pour 1 m ³	80
Tableau 4.6 : Formulation des MT pour 1m ³	80
Tableau 4.7 : Profil de vitesse imposé au cours d'un essai rhéologique pour le mortier.....	84

NOTATIONS

ρ_s : Masse volumique apparente du sable ;

f'_c : Résistance à la compression ;

$\dot{\gamma}$: Vitesse de déformation ;

Γ_m : L'étalement ;

R_m : La vitesse relative d'écoulement qui représente la viscosité ;

$\frac{E}{Add}$: Rapport eau/addition ;

θ : Angle de mouillage ;

τ : Contrainte de cisaillement ;

ρ_g : Masse volumique du mélange ;

ρ_g : Masse volumique apparente du gravier ;

M_g : Proportion de gros granulats ;

M_s : Proportion de petits granulats ;

Δm : Pourcentage de perte en masse ;

a et b : Constantes de comportement ;

C : Dosage en ciment ;

d_0 : Diamètre inférieur du cône ;

d_1 et d_2 : Diamètres d'étalements dans deux directions perpendiculaires ;

d_i : Diamètre moyen ;

E/C : Rapport massique entre l'eau et le ciment ;

E_{add} : Teneur en eau nécessaire pour les additions ;

E_c : Teneur en eau nécessaire pour le ciment ;

G_{add} : Densité des additions ;

G_g, G_s, G_C, G_E : Densités des gros granulats, du sable, du ciment et de l'eau ;

h : Hauteur du cylindre interne ;

HR : Humidité relative ;

k : Coefficient de prise en compte des additions ;

k : Coefficient de proportionnalité ;

L : Longueur de l'éprouvette à l'instant de la mesure ;

L_0 : Longueur initiale ;
 M : Masse molaire de l'eau ;
 M : Couple de rotation du cylindre interne ;
 M : Couple total appliqué sur le béton ;
 M_e : Couple à l'origine (frottement intrinsèque de l'agitateur) ;
 M_E : Dosage en eau ;
 M_g, M_s, C, M_E : Dosages des gros granulats, du sable, du ciment et de l'eau ;
 M_i : Masse granulaire ;
 m_{ini} : Masse initiale de l'éprouvette avant dessiccation ;
 m_t : Masse mesurée à l'instant t ;
 N_i : Nombre des particules ;
 P_a : Pression partielle d'air sec ;
 PF : Facteur de compactage ;
 P_g : Pression de phase gazeuse air humide (air sec + vapeur d'eau) ;
 P_l : Pression de l'eau liquide ;
 P_v : Pression partielle de vapeur d'eau ;
 P_{vs} : Pression de vapeur saturante ;
 R : Constante des gaz parfaits ;
 r : Rayon du pore où le ménisque existe ;
 R_0 : Rayon de séchage ;
 R_b : Rayon du cylindre interne ;
 R_c : Rayon externe ;
 r_i : Granulométrie du mélange ;
 S : Surface de l'éprouvette exposée au séchage ;
 $S/G+S$: Volume de proportion du sable sur le volume totale des granulats ;
 S_i : Surface développée ;
 T : Température absolue ;
 t : Temps d'écoulement à l'entonnoir ;
 V : Volume de l'éprouvette ;
 V_a : Volume d'air ;
 V_i : Volume de la particule ;
 V_{padd} : Volume des additions ;
 W : Vitesse de rotation du cylindre interne ;

η_p : Viscosité plastique ;

ρ : Tension superficielle de l'interface liquide/gaz ;

ρ_1 : %asse volumique de l'eau ;

σ'_c : Contrainte trouvée.

τ_0 : Seuil de cisaillement ;

Ω : Vitesse de rotation de la pôle ;

Abréviation :

BAP : Béton Autoplaçant ;

MBE : Mortier de Bétons Equivalents ;

MBAP : Mortier des Bétons Autoplaçants ;

MT : Mortier Thermiquement Equivalent.

INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation croissante des bétons lors de la réalisation d'ouvrages de grandes surfaces a révélé leur grande sensibilité à la fissuration précoce. Dès sa mise en place, le béton est sujet à des fluctuations volumiques causées par le développement microstructural de la matrice cimentaire et l'exothermie du processus d'hydratation du ciment. Sous certaines conditions structurales, environnementales et climatiques, ces déformations peuvent rapidement provoquer la fissuration prématurée du matériau et compromettre l'esthétique, les performances et la durabilité des ouvrages en service.

Ce phénomène est encore plus distingué dans les bétons autoplaçants (BAP) ou encore dans les mortiers autoplaçants qui connaissent aussi un véritable succès puisqu'ils sont souvent confectionnés pour la réalisation de chapes.

En effet, malgré une très bonne fluidité à l'état frais qui est à l'origine de leur succès et une bonne résistance à la compression, les bétons autoplaçants ont une faible résistance à la traction et une capacité de déformation très limitée à cause du volume de pâte et de la quantité de ciment élevés et à la présence des adjuvants.

Les variations dimensionnelles de retrait que subit la pâte de ciment (et donc le béton) sont relatives à la formation progressive des hydrates (hydratation du ciment) et à la dessiccation (mouvement d'eau à partir du matériau cimentaire vers le milieu ambiant dû à un gradient d'humidité).

A l'état frais, le béton connaît aussi une contraction de son volume, désignée de manière générale par le retrait plastique. Ce dernier est défini comme la contraction du béton en phase plastique consécutive au séchage. Il se développe lorsque la quantité d'eau évaporée à la surface est supérieure à la quantité d'eau de ressuage. Lorsque le retrait ne peut pas se faire librement dans une structure, le béton est mis en traction et risque, par conséquent, de se fissurer.

Les fissures du retrait plastique peuvent aussi se développer plus rapidement dans des climats plus chauds. Il convient d'apporter des corrections dans les compositions des BAP ou des mortiers autoplaçants « MAP » de telle façon à pouvoir atténuer la prédisposition à la fissuration de ces derniers.

Le contexte évoqué montre la nécessité d'entreprendre des études sur le comportement du matériau vis-à-vis du retrait afin de prévoir un mûrissement nécessaire et adéquat aux bétons

autoplaçants. Mais faut – il donc un mûrissement immédiat juste après la mise en place du béton ? Est-ce plutôt un mûrissement à long terme du béton? Et comment peut – on définir ce « long terme » ? Faut – il modifier le mode ou la période du murissement dans d'autres conditions climatiques ? Quelle est l'influence de la composition du mélange ?

Pour répondre à ces interrogations, il est donc nécessaire d'étudier la cinétique de l'ensemble des retraits et à différentes températures.

Cependant, nous nous intéresserons à l'étude du comportement rhéologique et des déformations instantanées des trois types de mortiers dérivés des bétons autoplaçants en intégrant deux types d'additions dans le mélange : les fillers calcaires et la pouzzolane. Le choix de faire la recherche sur des mortiers est justifié par le fait que leur comportement rhéologique est bien corrélé à celui du béton et aussi parce qu'ils présentent des cinétiques de déformations similaires à celles des bétons puisque les graviers sont peu déformables.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre de ce travail est destiné à l'étude bibliographique et se divise en deux parties. Des rappels sur les méthodes de formulation et les caractéristiques rhéologiques des BAP sont présentés en première partie. La deuxième partie traite les connaissances actuelles sur différents mortiers qui peuvent être dérivés d'un béton.

Le deuxième chapitre est consacré à la description du retrait ainsi que des différents mécanismes moteurs qui sont à l'origine de ce phénomène. Une panoplie de dispositifs expérimentaux nécessaires pour la mesure du retrait est présentée.

Le troisième chapitre traite la caractérisation des matériaux utilisés dans notre travail.

Le quatrième chapitre décrit le programme expérimental pour réaliser les objectifs déterminés pour ce mémoire. Ce programme comporte une étude du comportement rhéologique et des déformations instantanées des différents mortiers (MBE, MBAP et MT) dérivés de bétons autoplaçants et formulés pour notre étude. Une étude paramétrique intégrant deux types d'additions dans le mélange : les fillers calcaires et la pouzzolane est menée pour mettre en évidence l'intérêt du choix des additions pour remédier aux problèmes de la mise en place, du retrait et de la résistance mécanique. La dernière partie de ce chapitre met en évidence l'influence de la température sur le réseau de fissuration.

Enfin, une conclusion générale reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude et rapporte les intérêts pratiques qui en découlent. Elle ouvre également de nouvelles perspectives en termes d'expérimentation pour une meilleure compréhension du phénomène de retrait.

CHAPITRE 1

RHEOLOGIE DES BETONS AUTOPLAÇANTS & DES MORTIERS ASSOCIES

Le présent chapitre consiste à donner des généralités sur les Bétons Autoplaçants. La définition des BAP, les différentes approches de formulation, les études rhéologiques seront développées.

Nous présenterons aussi une étude approfondie sur la formulation et la rhéologie des différents types de mortiers associés au béton (Mortiers des Bétons Equivalents « MBE », Mortiers Thermiquement équivalent « MT » et les Mortiers de Bétons Autoplaçants classiques « MBAP »).

SOMMAIRE DU CHAPITRE 1 :

I.INTRODUCTION :.....	4
II. METHODES DE FORMULATION DES BAP :	4
III. ETUDE RHEOLOGIQUE :	13
IV.REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 1 :.....	29

I. INTRODUCTION :

La nouvelle famille des bétons, désignée sous l'appellation des Bétons Autoplaçants (BAP), se distingue principalement à l'état frais. Le concept BAP est né de la volonté de rendre le compactage du béton totalement indépendant du contexte de réalisation tant au plan technique que vis-à-vis de la main d'œuvre (Loukili, 2011).

Le Béton Autoplaçant est un mélange très fluide, homogène, stable et confère à la structure une résistance au moins égale à celle d'un béton ordinaire.

II. METHODES DE FORMULATION DES BAP :

Différentes méthodes de composition se sont développées ces dernières années pour la formulation des BAP. Elles reposent toutes sur une approche expérimentale plus ou moins lourde.

Parmi les méthodes de formulation les plus répandues on cite (Turcry, 2004):

- La méthode basée sur l'optimisation des mortiers (méthode Japonaise).
- La méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire (méthode LCPC).
- La méthode basée sur l'optimisation du facteur de compactage (méthode chinoise).

Quelque soit la méthode adoptée, l'analyse de 51 études effectuées à travers le monde (Domone, 2006) révèle que la composition des BAP est basée sur :

- Un volume de gravillons variant entre 28% et 38% du volume total du BAP,
- Un volume de pâte variant entre 30 à 42% du volume total du BAP,
- Un rapport E/L généralement inférieur à 0.48 en poids du BAP,
- Un dosage en liant (C+Additions) variant de 385 à 635 Kg/m³,
- Le dosage en superplastifiant proche de son dosage à saturation.

II.1 Méthode basée sur l'optimisation du mortier :

Cette méthode, proposée initialement par des chercheurs Japonais (Okamura et Ozawa, 1995) développée à l'Université de Kochi est, également, nommée méthode Japonaise. Elle permet d'obtenir des formulations fortement dosées en ciment ce qui conduit à privilégier le volume de pâte au détriment des granulats (Okamura et Ouchi 1999), (Okamura et col, 2000). Elle consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré est

compensé sur la main d'œuvre. Cette approche présente l'inconvénient d'avoir un volume de pâte très important, ce qui peut la rendre sujette aux phénomènes de retrait. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

II.1.1 Dosage des gravillons :

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1m^3 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 (figure 1.1). Le volume du gravier est donc fixé à la hauteur de 50% du volume des solides contenus dans le béton.

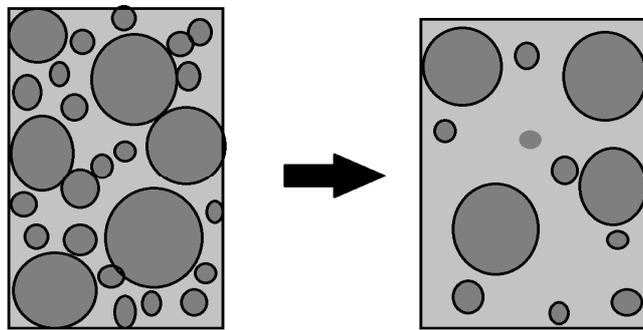


Figure 1.1 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité.

II.1.2 Dosage du sable :

Pour assurer une bonne ouvrabilité, Le volume du sable est fixé à 40 % du volume total du mortier. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

II.1.3 Dosage du liant :

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée en respectant la donnée des normes. Les rapports massiques E/C et E/C+A peuvent être choisis sur des critères de résistance.

II.1.4 Dosage de l'eau et du superplastifiant :

Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier (figure 1.2 - a) et des mesures d'écoulement à l'entonnoir (figure 1.2 - b).

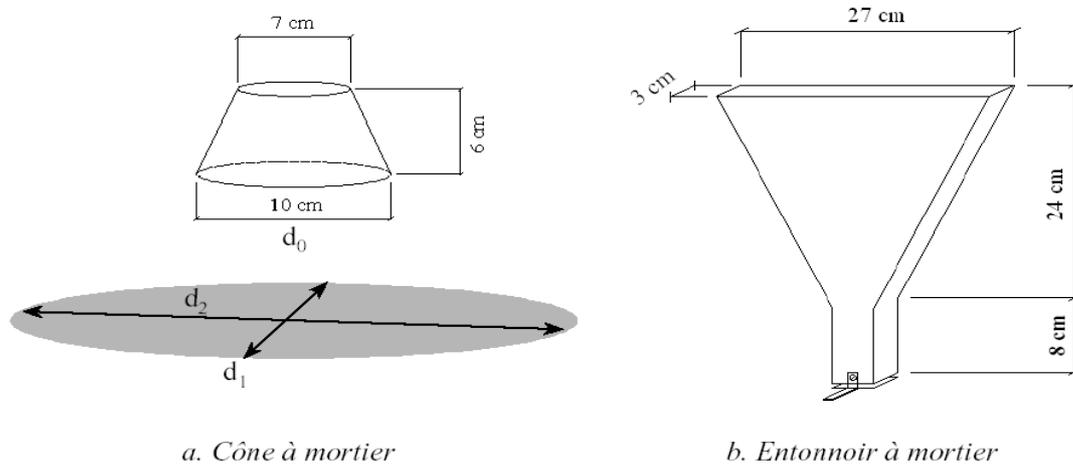


Figure 1.2: Dimensions du cône et de l'entonnoir à mortier.

Les grandeurs mesurées sont l'étalement de la galette de mortier et le temps d'écoulement à travers l'entonnoir. Ces grandeurs sont exprimées par les relations suivantes :

L'étalement relatif qui représente la fluidité :

$$\Gamma_m = \frac{(d_1 \cdot d_2 - d_0^2)}{d_0^2} \quad (1.1)$$

Où : d_1 et d_2 : sont les diamètres d'étalements dans deux directions perpendiculaires.

d_0 : est le diamètre inférieur du cône (10 cm).

La vitesse relative d'écoulement qui représente la viscosité :

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (1.2)$$

Où t : est le temps d'écoulement à l'entonnoir en secondes.

Les auteurs ont montré que la relation entre l'étalement Γ_m et l'écoulement R_m est linéaire lorsque le dosage en eau varie à quantité de superplastifiant constante.

Le couple étalement / écoulement atteint l'optimum lorsqu'il donne un béton avec un risque de ségrégation minimal.

Les auteurs optimisent le dosage du superplastifiant et le rapport E/C pour obtenir simultanément $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1 \pm 0,1$ [s⁻¹].

D'autres auteurs comme Turcry (2004) ont utilisé un optimum de $\Gamma_m = 10$ et $R_m = 1$ (voir figure 1.3).

La flèche indique le sens des rapports massiques eau sur fines (E/F) croissants. Le couple optimal est indiqué par un cercle.

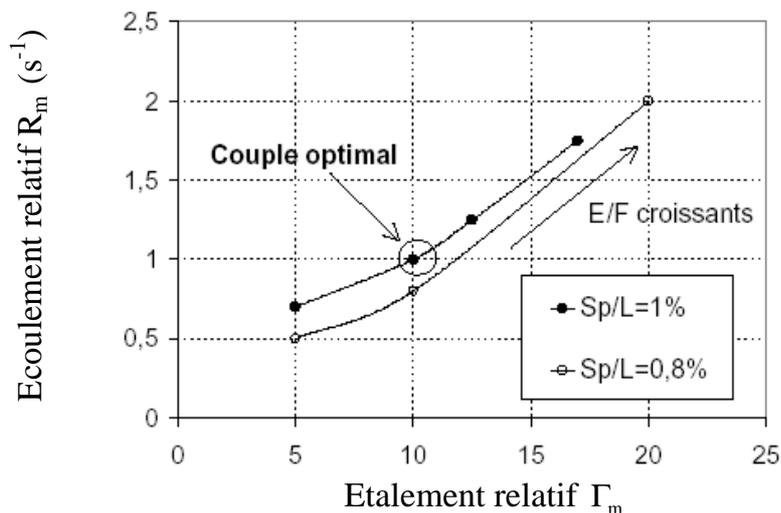


Figure 1.3 : Exemple de recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif (R_m) en fonction de l'étalement relatif (Γ_m) (Turcry, 2004).

Bensebti (2008) a remarqué qu'un étalement relatif proche de 8 et un temps d'écoulement relatif proche de $2,5s^{-1}$ peuvent amener à un Béton Autoplaçant à base de nos matériaux locaux.

II.2 Méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires :

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Cette optimisation de la compacité du béton permet de réduire la teneur en eau à ouvrabilité constante. Les chercheurs du LCPC ont essayé de modéliser le comportement du béton à l'état frais à partir du calcul de la compacité de l'empilement des grains solides. Ce modèle de calcul (Modèle d'Empilement Compressible), qui vise à prévoir la compacité d'un mélange à plusieurs classes, à partir de la connaissance des compacités des tranches monodimensionnelles, de la distribution granululaire du système et de l'énergie fournie pendant la mise en place. Il s'appuie sur les notions de compacité virtuelle et d'indice de serrage. Il est à noter que la compacité maximale est

différente si l'on choisie de diviser le squelette en classes monodispersées ou en tranches polydispersées.

Le modèle MEC fait intervenir deux notions physiques :

- La compacité virtuelle du mélange, noté γ : la compacité maximale que l'on pourrait atteindre en arrangeant, au mieux, l'empilement des grains qui s'étendent des Additions fines aux gravillons. Dans la pratique, les grains se positionnent avec un certain désordre. C'est ainsi que la compacité expérimentale du mélange, noté C est toujours inférieure à la compacité virtuelle.
- Indice de serrage K : grandeur représentative du degré de compaction d'une classe granulaire. Ainsi pour chaque classe granulaire de diamètre moyen d_i , on définit un indice de serrage K_i . Plus ce dernier est élevé plus les contacts entre les grains d'une même classe sont importants et plus le seuil de cisaillement t_0 est significatif.

Le modèle de l'empilement granulaire est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro), qui permet d'optimiser la composition du BAP à partir d'un cahier des charges précis et de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc.). Le «Bétonlab Pro» est un logiciel développé par « Sedran et De Larrard » qui associe plusieurs modèles de comportements du béton à la structure granulaire décrite par le modèle d'empilement compressible. Il permet de réduire considérablement le nombre d'essais sur les bétons, même si des essais de validation sont toujours nécessaires pour s'assurer que les spécifications des cahiers de charges sont bien atteintes (Siad, 2010).

L'utilisation de cette méthode nécessite la réalisation de certains essais expérimentaux pour déterminer la compacité du sable, la compacité des gravillons, la demande en eau du ciment avec superplastifiant, la demande en eau des fillers avec superplastifiant et le dosage à saturation du superplastifiant pour le ciment.

II.3 Méthode de formulation Chinoise :

Dans beaucoup de pays européens et américains, la méthode japonaise a été adoptée et employée comme un point de départ pour le développement des BAP. Plus récemment, Su et col (2001) ont proposé une nouvelle méthode pour composer le BAP. Elle consiste à déterminer le volume des granulats (sable et gravier) à partir d'un facteur de compactage et de remplir les vides entre ces derniers avec la pâte afin d'assurer une bonne fluidité du béton à l'état frais et aussi une bonne résistance à l'état durci.

II.3.1 Calcul du dosage des granulats :

Le facteur de compacité « PF » (Packing Factor) des granulats est défini comme la proportion de la masse des granulats dans le cas bien remplis dans le BAP que dans le cas moins rempli. Ce paramètre « PF » influe sur la teneur des granulats dans le BAP. Une valeur forte de « PF » est signe d'une grande quantité de gros et de fins granulats utilisés. Par conséquent, la capacité du Béton Autoplaçant et la résistance à la compression seront réduits. Il est donc nécessaire d'optimiser le paramètre « PF » afin de ne pas avoir un surplus de granulats qui pourra diminuer la fluidité du mélange ou être source de blocage. Les proportions du sable et du gravier peuvent être calculées par les deux équations suivantes :

$$\text{Sable :} \quad M_s = PF \times \rho_s \times \left(\frac{S}{G+S} \right) \quad (1.3)$$

$$\text{Gravier :} \quad M_g = PF \times \rho_g \times \left(1 - \frac{S}{G+S} \right) \quad (1.4)$$

M_g : Proportion du gravier (Kg/m³),

M_s : Proportion du sable (Kg/m³),

ρ_g : Masse volumique apparente du gravier (Kg/m³),

ρ_s : Masse volumique apparente du sable (Kg/m³),

$\frac{S}{S+G}$: Volume de proportion du sable sur le volume totale des granulats.

D'après une étude menée par Su et col(2003), un PF variant entre 1.16 et 1.20 a permis de conduire à des BAP avec une très bonne fluidité.

II.3.2 Calcul du dosage de ciment :

Généralement, les BAP utilisés en Tawain offrent une résistance à la compression égale à 20psi (0.14MPa)/Kg de ciment (Su et col, 2001). Donc, le dosage de ciment est défini comme suit:

$$C = \frac{f'_c}{20} \quad (1.5)$$

C : dosage en ciment (Kg/m³),

f'_c : Résistance à la compression (psi),

1bars =14.51psi,

II.3.3 Calcul de dosage en eau :

Le calcul de la quantité d'eau est basé sur la connaissance du rapport E/C nécessaire à la résistance recherchée. Ainsi, le volume d'eau nécessaire pour le ciment est calculé par l'équation suivante :

$$M_E = \left(\frac{E}{C} \right) \cdot C \quad (1.6)$$

Avec :

M_E : le dosage en eau en kg/m^3 .

E/C : le rapport massique entre l'eau et le ciment.

C : le dosage en ciment.

II.3.4 Calcul du volume des Additions :

Ces dernières ont pour but de combler les vides, et d'améliorer la fluidité du matériau ainsi que sa résistance à la ségrégation. Le volume des Additions est déterminé comme suit :

$$V_{Padd} = 1 - \frac{M_g}{1000 \times G_g} - \frac{M_s}{1000 \times G_s} - \frac{C}{1000 \times G_C} - \frac{M_E}{1000 \times G_E} - V_a \quad (1.7)$$

Avec :

G_g, G_s, G_C, G_E : sont respectivement les densités du gravier, du sable, du ciment et de l'eau.

M_g, M_s, C, M_E : sont respectivement les dosages du gravier, du sable, du ciment et de l'eau (kg/m^3).

V_a : Volume d'air (%).

De ce fait, le dosage des additions nécessaires (M_{Add}) pourra être déterminé à partir de l'équation :

$$V_{Padd} = \left(1 + \frac{E}{Add} \right) \times \frac{M_{add}}{1000 \times G_{add}} \quad (1.8)$$

Avec :

G_{Add} : est la densité des additions utilisées comme les fillers de calcaires par exemple.

$\frac{E}{Add}$: est le rapport eau/addition. Ce rapport est obtenu expérimentalement sur des pâtes suivant la norme (ASTM C230), de telle façon à avoir la même consistance et la même fluidité qu'une pâte de ciment de rapport E/C déterminé préalablement.

Le dosage des Additions étant connu, il sera donc possible de déterminer leur dosage en eau nécessaire (E_{Add}) :

$$E_{Add} = \left(\frac{E}{Add} \right) \cdot M_{add} \quad (1.9)$$

II.3.5 Calcul de la teneur en eau total :

La teneur en eau nécessaire sera la somme de toutes les teneurs en eau nécessaires pour les Additions et le ciment, tel que :

$$E = E_c + E_{Add} \quad (1.10)$$

E_c : teneur en eau nécessaire pour le ciment,

E_{Add} : teneur en eau nécessaire pour les Additions.

II.3.6 Calcul du dosage en superplastifiant :

Elle consiste à déterminer le dosage de saturation du superplastifiant afin de déflocculer les grains de ciment ainsi que les additions.

$$SP = n\% \cdot (C + M_{add}) \quad (1.11)$$

Il est évident de retrancher le dosage en eau contenu dans le superplastifiant du dosage en eau global. Il est plus qu'important de vérifier les caractéristiques du BAP à l'état frais à travers des essais (étalement, L – Box, V – funnel, ...) avant de valider la formulation.

La méthode proposée par Su et col (2001) a permis d'obtenir des BAP qui répondent aux exigences demandées pour ce type de béton à l'état frais mais aussi à l'état durci. Le paramètre essentiel pour cette étude est le facteur « PF » qui devra être soigneusement déterminé. Néanmoins, les bétons obtenus comportent plus de sable (54 – 60% en volume dans le mortier) et moins d'agrégats. Il reste à ce titre judicieux d'évaluer le module élastique du béton.

Le tableau 1.1 résume quelques exemples de BAP en Taiwan alors que le second tableau représente des mélanges de BAP en France formulés par la même approche chinoise:

Tableau 1.1: Constituants du BAP (Kg/m^3), (Su et col, 2001).

$\sigma'c$	Gros granulats	Fins Granulats	Ciment	Cendres volantes	Pouzzolanes GGBS	Eau	Sp
27.5	743	961	200	157	67	176	7.6
34.3	731	945	250	154	66	173	8.5
41.2	718	928	300	148	63	172	8.2
48.0	706	912	350	142	61	170	8.8

Tableau1.2: Exemples de différentes compositions utilisées en France (Kg/m^3) (Hilali, 2009).

	Ciment	Filler	Gravillons	Gravillons	Sable	Eau	Sp
MAR.82	451	59	557	299	858	182.7	6.98
BRE.97	385	120	563	302	867	174	6.24
CEB.93	312	186	566	304	872	169.2	5.38
AL.93	480	0	568	305	918	166.1	7.20
AIT.90	475	0	562	302	909	174.4	7.13
LUK.90	470	0	556	299	900	182.6	7.06

A la lecture de ces deux tableaux, il est clair que même si la démarche adoptée reste identique, les dosages des différents constituants peuvent varier considérablement d'un pays à l'autre. Il est aussi important de spécifier que la formule empirique pour déterminer le dosage en ciment Taiwan n'est pas utilisée en Europe.

En comparant avec la méthode proposée par les japonais, la méthode chinoise repose sur une démarche scientifique et aboutit à des mélanges moins coûteux.

II.4 Bilan :

Après avoir présenté un ensemble de méthodes de formulation de BAP, il est clair que la démarche reste identique : choisir des proportions de granulats de manière à diminuer les frottements et le risque de blocage, le volume et la composition de la pâte nécessaire pour envelopper les granulats et assurer une bonne fluidité au mélange. Néanmoins, l'approche adoptée diffère d'une méthode à l'autre. Les japonais ont préféré se baser sur une démarche sécuritaire en sous-estimant le volume des granulats afin de garantir l'absence de tout blocage. Ils ont par ce fait proposé une méthode qui conduit à des BAP onéreux. La méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire semble être adaptée pour formuler un

BAP à un coût raisonnable. Cette méthode se base sur l'utilisation du logiciel Bétonlab Pro qui est certainement l'approche la plus cartésienne de la formulation des BAP (et des bétons en général) ; on caractérise d'abord finement les constituants, puis on formule. C'est un outil pédagogique intéressant, puisqu'il permet d'appréhender l'influence de chaque constituant sur le comportement du béton, au moyen de simples simulations. L'inconvénient de cette méthode repose sur la nécessité de l'acquisition de nombreux équipements expérimentaux (comme le banc d'essai de compacité « LCPC ») et surtout de l'acquisition du logiciel « Bétonlab Pro ». Les auteurs de la méthode chinoise se sont basés sur une formule empirique pour déterminer le dosage en ciment, sans donner de précision sur le type de ciment. La même formule qui relie proportionnellement la résistance au dosage en ciment ne prend pas en considération le concept E/C qui a été le pilier de la technologie du béton pendant presque un siècle.

III. ETUDE RHEOLOGIQUE:

III.1 Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP :

La caractérisation d'un béton fluide à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique. La rhéologie donne les relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume, en tenant éventuellement compte de leur histoire et des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps. Ces relations, dites de comportement, font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées. Le comportement rhéologique d'un matériau est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement, τ_0 .

Le fluide est considéré comme *binghamien* si la courbe d'écoulement est une droite, qui a pour équation :

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} \quad (1.12)$$

τ la contrainte de cisaillement (Pa),

τ_0 le seuil de cisaillement (Pa),

η_p la viscosité plastique (Pa.s),

$\dot{\gamma}$ la vitesse de déformation (S^{-1}),

En ce qui concerne les Bétons Autoplaçants, des auteurs (De Larrard, 1996) ont montré que leur équation de comportement suit le modèle de *Herschel-Bulkley* dont l'équation de comportement est la suivante :

$$\tau = \tau_0 + a\dot{\gamma}^b \quad (1.13)$$

Où a et b sont des constantes de comportement.

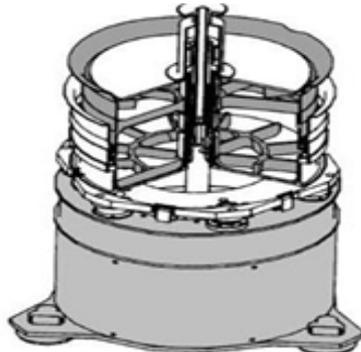
Toutefois, ce modèle est plus exigeant que celui de *Bingham* car il nécessite la détermination d'un paramètre supplémentaire.

Les grandeurs (seuil de cisaillement, viscosité plastique), permettant de définir le comportement d'un béton lors de sa mise en place, sont quantifiables à partir d'appareils appelés rhéomètres, tels que :

- le viscosimètre à plaque parallèle BML (Figure 1.4.a),
- le rhéomètre coaxial BTRhéom (Figure 1.4.b),
- le rhéomètre IBB (Figure 1.4.c),



(a) : Rhéomètre BML à cylindres coaxiaux



(b) : Rhéomètre plan-plan BTRhéom



(c) : Malaxeur instrumenté IBB

Figure 1.4 : Types de rhéomètres

Tous ces appareils mesurent le couple résistant du béton en fonction de la vitesse d'écoulement imposée (par mise en rotation de divers mobiles ou palettes). Ces deux données permettent ensuite d'obtenir, par différents calibrages, les grandeurs caractéristiques de l'écoulement du béton, à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité plastique (Assié, 2004).

Soualhi et col (2014) ont validés un nouveau rhéomètre adapté aux bétons frais, avec un protocole d'essai pertinent procurant des mesures rhéologiques précises et peu coûteuses. Cet appareil peut être utilisable sur chantier et dans les laboratoires afin de répondre à la demande de l'industrie.

III.2 Principe de fonctionnement du rhéomètre :

Le principe consiste à mettre en rotation à différentes vitesses une pôle en forme de croix dans un échantillon cylindrique de béton frais et à mesurer les couples exercés pour maintenir la rotation. Un essai rhéologique s'effectue en imposant une vitesse de rotation décroissante à la pale entre coupé de paliers de stabilisations afin d'effectuer les mesures. Toutes les secondes, le logiciel de pilotage de l'agitateur enregistre le couple de rotation (M) correspondant à la vitesse de rotation (Ω) imposée. Le résultat brut d'un essai réalisé avec le rhéomètre se présente sous la forme d'une fonction linéaire liant le couple et la vitesse de rotation :

$$M = M_0 + k \Omega \quad (1.14)$$

M (Km) le couple total appliqué sur le béton;

M_0 (N.m) le couple à l'origine (frottement intrinsèque de l'agitateur) ;

k (Km,s) un coefficient de proportionnalité;

Ω (tour/s) la vitesse de rotation de la pôle.

III.3 Description de l'appareil :

Le rhéomètre se compose de trois parties principales (figure 1.5) :

- (a) un agitateur à régulation électronique de la vitesse permettant l'enregistrement des couples via une Maison RS232 ;
- (b) un récipient ;
- (c) une pôle en acier.

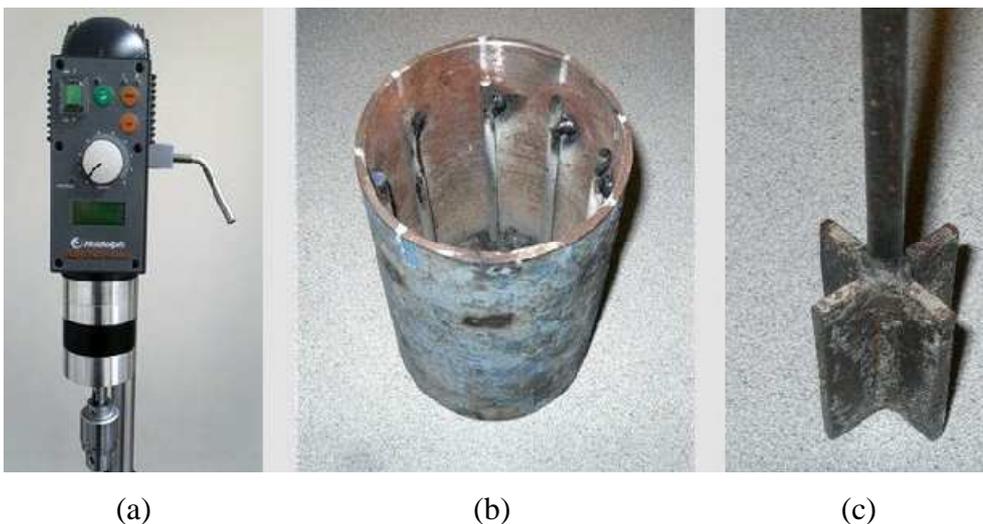


Figure 1.5 : Composants du rhéomètre ; (a) agitateur ; (b) récipient ; (c) pôle

III.3.1 L'agitateur :

L'agitateur est l'élément principal pour la réalisation des essais dont les caractéristiques sont données dans le tableau ci-dessous, il est fixé à un bras, via une mâchoire, qui est elle-même fixée sur un trépied. L'agitateur est piloté par un ordinateur à l'aide d'un logiciel (Watch & Control).

Tableau 1.3 : Caractéristiques de l'agitateur.

Vitesse (tr/min)	Couple max. (N.cm)	Régulation électronique	Affichage vitesse	Affichage couple
4 à 540	740	Oui	oui	oui

III.3.2 La pôle :

La pôle en forme de croix est fixée dans le mandrin de l'agitateur. La pôle pour béton mesure 12,5 cm de hauteur pour un diamètre de 10,5 cm, par contre celle pour mortier mesure 10 cm de hauteur et 5 cm de diamètre.

III.3.3 Le récipient :

Le récipient pour béton est un cylindre de 30 cm de diamètre et de 32,5 cm de hauteur. Afin d'optimiser l'adhérence du béton sur la paroi extérieure du récipient des baguettes en acier ont été soudées. Le récipient spécifique pour les mortiers est aussi cylindrique de 10 cm de diamètre et de 13 cm de hauteur (figure 1.6).

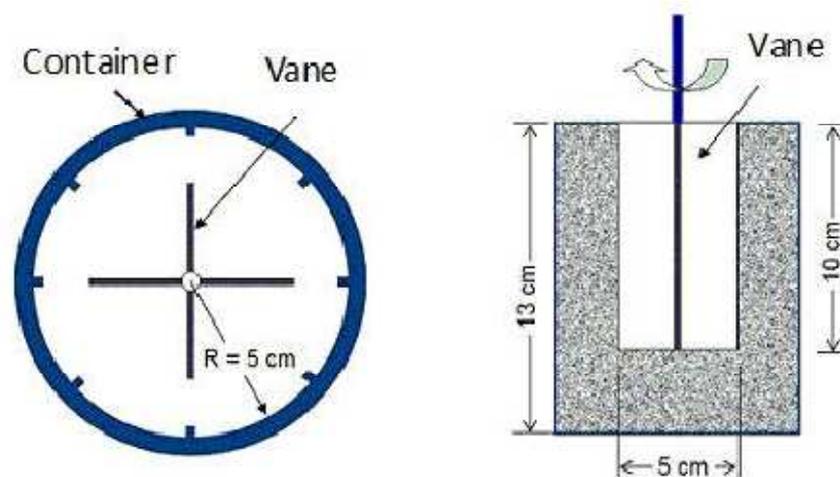


Figure 1.6 : Position de la pale dans le mortier.

III.4 Procédure d'essai :

Les mesures sont réalisées avec le profil de vitesse préalablement défini. Les étapes sont comme suit :

- 1^{ière} étape : Mesure des couples à vide (M_{vide}). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est vide.
- 2^{ème} étape : Remplissage du béton dans le récipient pour un béton ordinaire. Il s'effectue en trois couches, chaque couche reçoit 25 coups de piquage à l'aide d'une tige. Pour un BAP, on remplit directement le récipient sans moyen de serrage.
- 3^{ème} étape : Positionnement de la pale. La pale est centrée et plongée au milieu du béton en sorte qu'il y ait une couche de béton de 10 cm d'épaisseur au dessus et en dessous de la pale (figure 1.6).
- 4^{ème} étape : Mesure des couples totaux (M_{total}). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est rempli de béton.
- 5^{ème} étape : Calcul des couples finaux (M). Les couples finaux s'obtiennent par la différence entre les couples totaux et les couples à vides correspondant à chaque palier de vitesse :

$$M = M_{\text{total}} - M_{\text{vide}} \quad (1.15)$$

- 6^{ème} étape : Exploitation des mesures et calcul des paramètres rhéologiques.

III.5 Caractérisation des BAP à l'état frais :

La caractérisation rhéologique des BAP peut aussi se faire à base d'essais empiriques. Trois essais de caractérisation ont été préconisés en l'an 2000 par l'Association Française de Génie Civil (AFGC, 2000). D'abord provisoires, ces recommandations sont devenues sur site les essais de référence pour valider une formule de BAP.

III.5.1 Essai d'étalement :

L'essai classique au cône d'Abrams est utilisé pour mesurer un étalement (figure 1.7), dont le diamètre est proportionnel au seuil de cisaillement du béton. Il donne donc une indication sur sa capacité à « s'auto-compacter » en milieu non confiné.



Figure 1.7 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

III.5.2 Essai à la boîte en L :

Lors de l'essai, on remplit d'abord la partie verticale d'une boîte en forme de L (figure 1.8). Après une minute, la trappe est levée permettant l'écoulement à travers trois armatures de diamètre 14 mm et distantes de 39 mm. Le taux de remplissage final H_2/H_1 renseigne sur la mobilité du béton en milieu confiné.

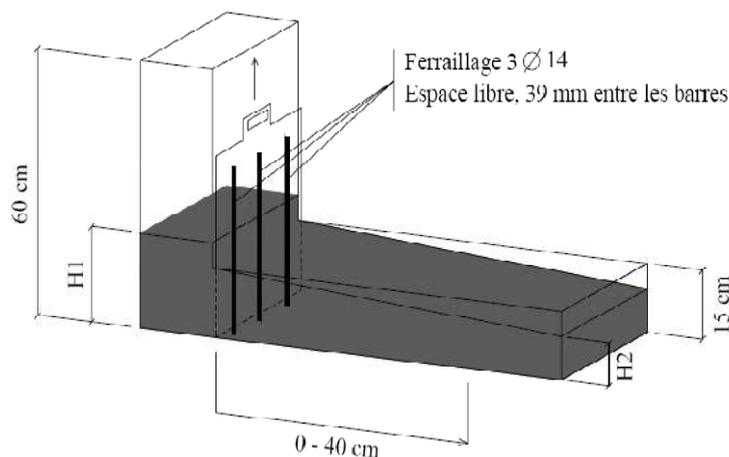


Figure 1.8 : Essai de la boîte en L

Dans le même ordre d'idée, l'essai de l'anneau japonais peut aussi être utilisé. Cet essai consiste à évaluer la différence entre le comportement du béton sans et avec obstacles. Il s'agit d'un anneau sur lequel différentes armatures peuvent être fixées.

III.5.3 Essai de stabilité au tamis :

L'aptitude d'un BAP à rester homogène une fois coulé est aussi importante que celle durant la mise en place. L'homogénéité du matériau conditionne en effet ses propriétés à l'état durci (résistance mécanique, retrait, durabilité, etc.). Le béton doit donc être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présente une capacité de ressuage limitée.

A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de quinze minutes, une masse 4,8 kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5 mm. Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis (figure 1.9). Un pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation, Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes

- $0\% < P_{\text{LAITANCE}} < 15\%$: 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

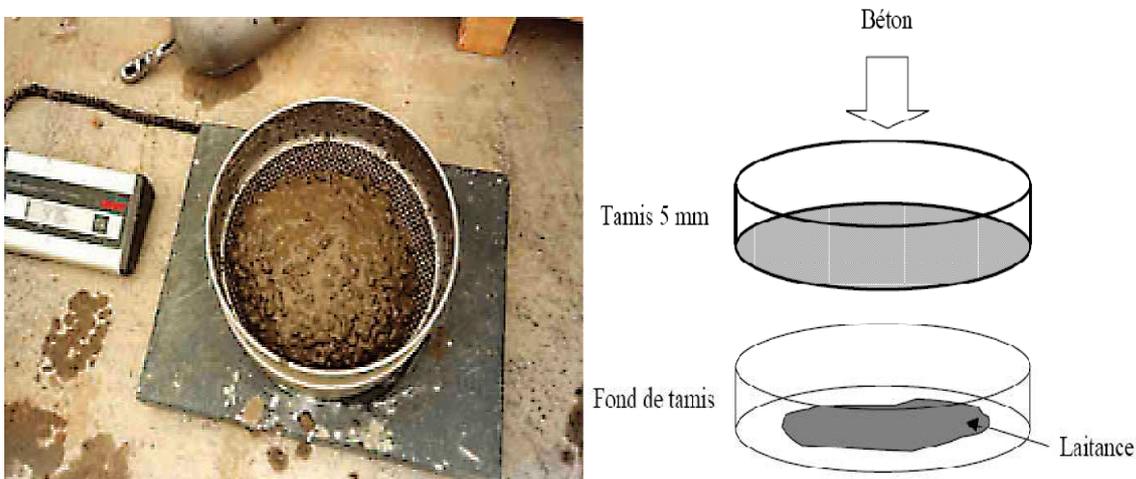


Figure 1.9 : L'essai de stabilité au tamis.

L'AFGC a proposé en plus un essai de mesure du ressuage, qui semble avoir été abandonné aujourd'hui, car peu pertinent (le ressuage est faible chez les BAP) et très contraignant (utilisation d'un liquide nocif). Le tableau 1.4 donne les valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAP.

Tableau 1.4 : Valeurs préconisées pour les essais AFGC.

Etalement	60 à 75 cm
H_2/H_1	>0.8
Laitance	0 à 15%

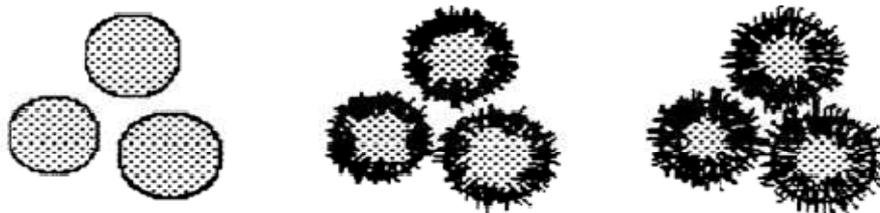
III.6 Etude rhéologique sur les mortiers :

Il est parfois intéressant d'étudier le comportement rhéologique des bétons sur des mortiers judicieusement choisis. Cette démarche présente l'avantage de rendre les essais moins lourds vu que le volume du matériau requis devient plus faible. Il existe plusieurs manières d'obtenir des mortiers à partir de la composition d'un béton : on peut par exemple conserver la fluidité initiale, le comportement thermique, la distance intergranulaire (Dierkens, 2005).

III.6.1 Mortier des Bétons Equivalents (MBE) :

Avec l'apparition des bétons fortement adjuvantés, des problèmes d'incompatibilité entre ciment et adjuvant (raidissement prématuré du béton) apparaissent parfois sur chantier, bien que les produits soient conformes aux normes en vigueur. Pour détecter cette problématique, une nouvelle méthode a été proposée. Il s'agit de la méthode du Mortier des Bétons Equivalents (MBE). Cette dernière a été développée dans le cadre du projet national Calibé tout en permettant de réaliser facilement des essais sur mortiers plutôt que sur bétons. Le calcul des MBE est basé sur deux réflexions permettant de penser que ce sont les surfaces de contact des constituants qui importent, plutôt que leurs volumes (Dierkens, 2005) :

- la première découle du fait que l'ouvrabilité d'un béton provient de la façon dont ses constituants arrivent à « glisser » les uns sur les autres pour s'écouler.
- la seconde a pour origine la chimie de la prise, les hydrates se formant plutôt au niveau des interfaces (figure 1.10).

**Figure 1.10** : Formation d'hydrates à la surface des granulats (Acker, 1988).

Calculer un MBE consiste ainsi à remplacer les graviers du béton par du sable dont la surface développée des grains est égale à celle du gravier que l'on a ôté.

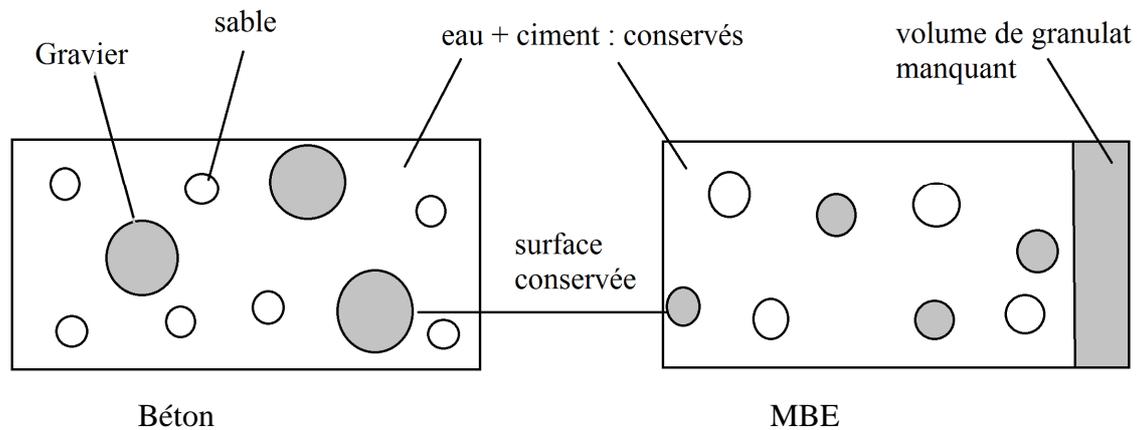


Figure 1.11 : Passage du béton au MBE

Lorsque l'on passe de la formulation d'un béton à celle d'un MBE (figure 1.11) :

- l'étendue granulométrique diminue, ce qui conduit à une augmentation des distances intergranulaires.
- le rapport surface/volume des petites particules est plus élevé que pour les grandes particules. Le gravier est donc remplacé par une masse moindre de sable. Indépendamment de l'air (non contrôlable), la capacité calorifique du MBE est alors plus faible que celle du béton associé, alors que la chaleur d'hydratation produite est conservée (mêmes quantités d'eau et de ciment). Les MBE devraient donc atteindre des températures plus élevées que leurs bétons associés. Leurs réactions de prise seront ainsi plus thermoactivées que celles des bétons.

III.6.1.1 Principe de la méthode du Mortier des Bétons Equivalents (MBE):

Le principe de la méthode MBE est basé sur l'existence d'une corrélation simple reliant les propriétés rhéologiques d'un béton au mortier qui le compose (Projet national CALIBE, 2000). Ce dernier peut être obtenu à partir d'une composition théorique qui est déduite directement de celle du béton en corrigeant la quantité de sable de manière à ce que la surface granulaire unitaire du MBE soit la même que celle du béton. Les propriétés rhéologiques du MBE sont mesurées à l'aide d'un mini-cône (figure.1.12 (a)) dont les dimensions sont déduites de celles du cône d'Abrams (figure 1.12(b)) par un rapport homothétique de deux, de manière à balayer une large gamme de consistance.

Deux types de mesures sont effectués après le soulèvement du mini-cône l'affaissement et l'étalement du MBE étudié.

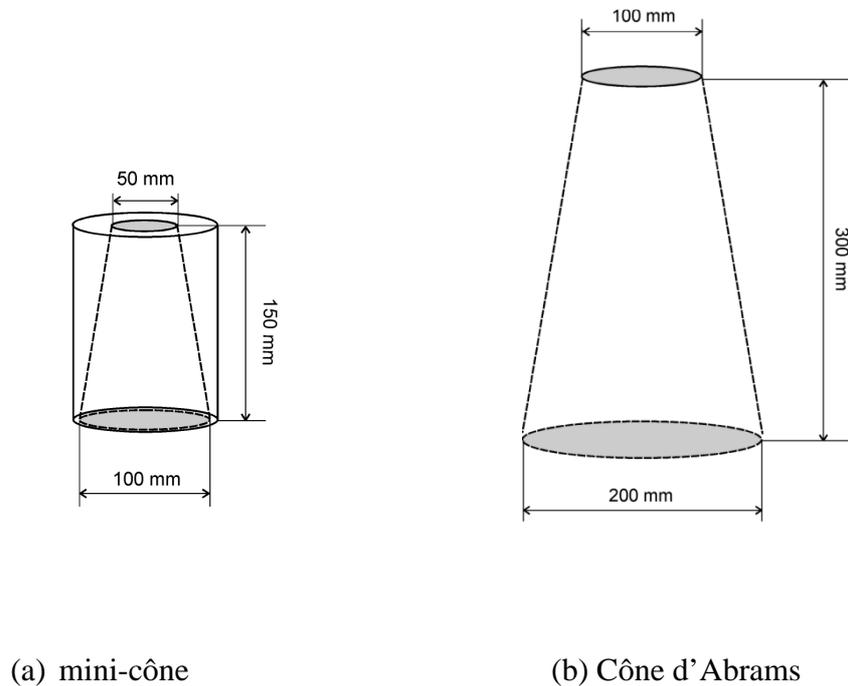


Figure 1.12 : Cône pour béton et pour mortier.

Schwartzentruber et Catherine, (2000) ont trouvé une corrélation linéaire bien établie entre l'affaissement mesuré au cône d'Abrams et l'étalement mesuré au mini-cône. La relation entre ces deux mesures est modélisée par une droite valable dans les plages de mesures étudiées. La droite de corrélation doit être déterminée expérimentalement pour chaque composition.

Une corrélation linéaire a alors été trouvée entre l'affaissement des bétons et l'étalement des MBE (figure 1.13), sur une durée de 90-120 min (1 mesure toutes les 15 min). La droite obtenue varie selon les formulations testées et selon les températures de coulée. Les coefficients de détermination sont compris entre 0,72 (plutôt mauvais) et 0,99 (bonne corrélation).

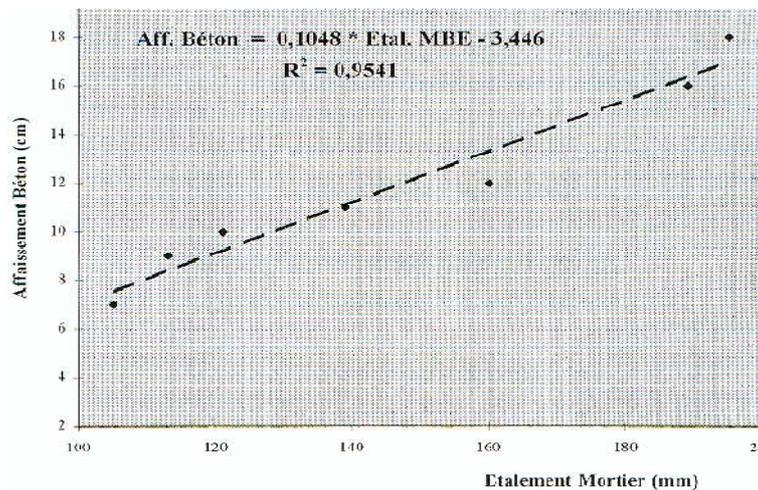


Figure 1.13: Corrélation linéaire entre affaissement au cône et étalement au mini-cône (Equipe RMC ,1998 cité par Dierkens, 2005).

Il est important de noter que la méthode a été considérée comme optimale pour des bétons ayant des affaissements entre 10 et 22 cm.

III.6.1.2 Calcul de la composition du Mortier des Bétons Equivalents :

La formulation de MBE se fait directement à partir de la composition du béton initiale. Les mêmes constituants et les mêmes dosages doivent être conservés, excepté les gravillons qu'il faut retirer. Toutefois, il faut considérer que les quantités de pâte et de particules fines de sable qui adhèrent aux gravillons sont proportionnelles à la surface des gravillons (Schwartzentruber et Catherine, 2000). Les surfaces spécifiques des sables et des gravillons utilisés doivent être donc déterminés comme suit :

- tous les granulats sont des sphères.
- ces sphères sont considérées indéformables dans l'eau.
- à l'intérieur de chaque tranche granulaire, la densité de la particule moyenne est considérée indépendante de sa taille et reste égale à celle du granulat considéré.

Les données nécessaires au calcul sont l'analyse granulométrique de chaque constituant ainsi que leurs masses volumiques réelles. Les étapes de calcul des surfaces développées des granulats sont les suivantes :

- calcul de la granulométrie du mélange des gravillons du béton,
- définition des tranches granulaires successives dans ce mélange,
- calcul de la masse de chaque tranche granulaire,
- calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche,
- calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche,
- calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche,

- calcul du volume massique de la matrice du gravillon du mélange,
- calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire,
- calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire,
- calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire,
- somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillons.

➤ **Granulométrie du mélange des gravillons du béton :**

Les deux gravillons de l'étude sont G4/8 et G8/16. Leurs masses volumiques et leurs dosages dans le béton sont notées respectivement r_1 , r_2 , et g_1 , g_2 . Quant aux refus obtenu pour chaque tamis, il est noté R_{i1} et R_{i2} . La granulométrie (passant) du mélange sur chacun des tamis est alors donnée par la relation de proportionnalité :

$$r_i = (g_1 \cdot r_{i1} + g_2 \cdot r_{i2}) / (g_1 + g_2) \quad (1.16)$$

De même la masse volumique du mélange est déterminée par la relation :

$$\rho_g = (g_1 \cdot \rho_1 + g_2 \cdot \rho_2) / (g_1 + g_2) \quad (1.17)$$

➤ **Masse de chaque tranche granulaire :**

Chaque tranche granulaire est limitée par un tamis supérieur (TM_i) et par un tamis inférieur (Tm_i). Les refus correspondant à ces tamis sont respectivement (RM_i) et (Rm_i) (exprimé en %). Les tamis retenus pour définir les tranches granulaires sont les suivants : 20 / 16 / 12,5 / 10 / 8 / 6,3 / 5 / 4 / 3,15 / 2,5 / 1,25 / 0,63 / 0,315 / 0,16 / 0,08 / <0,08 mm.

La masse M_i de chaque tranche granulaire est définie par la relation :

$$M_i = (Rm_i - RM_i) \times (g_1 + g_2) / 100 \quad (1.18)$$

➤ **Diamètre, volume et surface de la particule moyenne dans chaque tranche :**

La taille moyenne d_i de chaque tranche granulaire est donnée par la relation :

$$d_i = (TM_i + Tm_i) / 2 \quad (1.19)$$

Avec l'hypothèse d'ellipticité, le volume de chaque particule moyenne est donné par :

$$v_i = (\pi \cdot d_i^3) / 6 \quad (1.20)$$

Et sa surface développée par :

$$s_i = \pi \cdot d_i^2 \quad (1.21)$$

➤ **Volume de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire :**

Il est le produit de la masse M_i de la tranche granulaire par le volume massique du gravillon :

$$V_i = \omega \cdot M_i \quad (1.22)$$

Avec : $\omega = 1 / \rho_g$

➤ **Nombre de particules et surface développée dans chaque tranche granulaire :**

Le nombre de particules moyennes est égal au rapport du volume total (V_i) de l'ensemble des particules de la tranche granulaire au volume unitaire de la particule moyenne (v_i). La surface développée est égale au produit de la surface de la particule moyenne par le nombre de particules moyennes :

$$N_i = V_i / v_i \quad \text{et} \quad S_i = N_i \cdot S_i \quad (1.23)$$

➤ **Surfaces totale du mélange de gravillon et de sable:**

Elle est égale à la somme des surfaces calculées pour chaque tranche :

$$SD = \sum_i S_i \quad (1.24)$$

III.6.2 Mortiers thermiquement équivalents (MT):

Les réactions chimiques intervenant dans la prise des bétons sont thermoactivées. Pour obtenir des mortiers comparables à des bétons donnés, on peut donc essayer de conserver une même histoire thermique, en fabriquant des mortiers dégageant la même chaleur d'hydratation et ayant la même chaleur spécifique massique. Pour arriver à ce résultat, il suffit de conserver les quantités de ciment et d'eau et de remplacer le gravier par une même masse de sable. La masse de sable du mortier est alors égale à la somme des masses de sable et de gravier du béton (Dierkens ,2005).

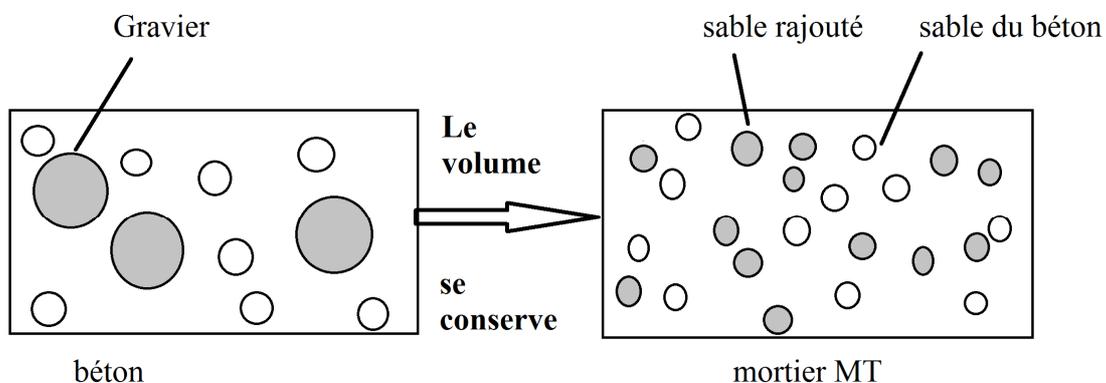


Figure 1.14 : Passage du béton au mortier MT.

Lorsque l'on passe de la formulation d'un béton à celle d'un mortier MT (figure 1.14) :

- le remplacement du gravier par du sable diminue l'étendue granulométrique, le mortier est réalisé avec une partie du sable du béton) : on devrait donc obtenir une augmentation de la distance intergranulaire.
- le gravier a été remplacé par une même masse de sable. Les grains de sable ayant un volume plus petit que celui des graviers, il en résulte que la surface globale des granulats a augmenté, alors que la surface du ciment et de l'eau est conservée. On peut ainsi penser que les mortiers MT frais sont moins fluides que les bétons associés car il faut plus de pâte pour enrober et écarter les grains de sable de manière comparable.
- la quantité d'air présente dans le mortier MT ne peut pas être contrôlée lors de sa fabrication. Celle-ci peut donc varier d'une formulation à l'autre et avoir une influence (très faible) sur l'inertie thermique du matériau, qui ne sera donc pas rigoureusement conservée lors du passage du béton au mortier MT.

III.6.3 Mortiers classiques du béton (MB) :

Certains auteurs (Turcry, 2004) ont montré qu'il existe aussi une bonne corrélation entre les comportements à l'état frais du BAP et de son mortier. Les compositions des Mortiers de Bétons Autoplaçants (MBAP) sont établies à partir de la composition initiale du béton. Il suffit tout simplement d'enlever les quantités de graviers.

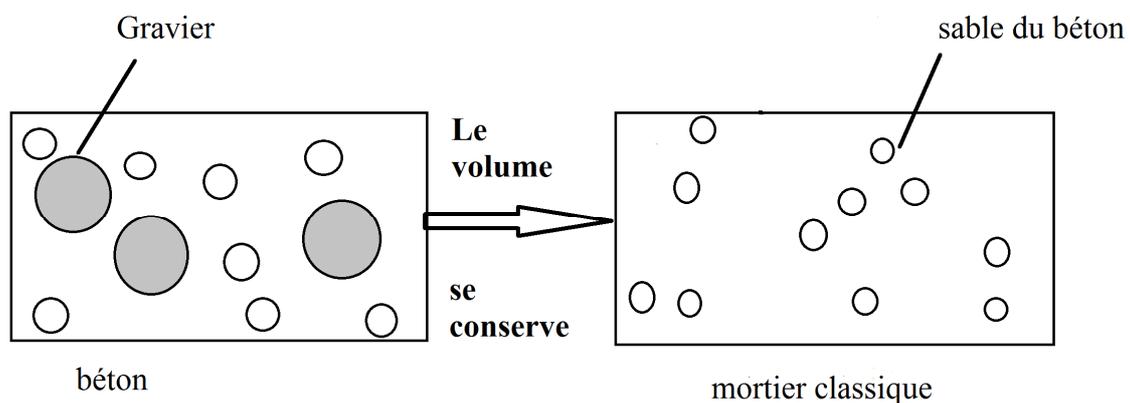


Figure 1.15 : Passage du béton au mortier classique.

Lorsqu'on passe de la formulation du béton à celle d'un mortier classique :

- L'étendue granulométrique diminue, ce qui conduit aussi à une augmentation de la distance intergranulaire.
- La chaleur d'hydratation produite est conservée, ce qui induit que la réaction de prise des mortiers classiques sera plus thermoactivée que celle du béton.

III.6.4 Essais d'évaluation du comportement rhéologique des mortiers :

III.6.4.1 Essais d'affaissement au mini-cône :

Utiliser un mini-cône dont la paroi intérieure est propre et légèrement humidifié. La surface d'étalement sur la plaque de base doit également être propre et légèrement humidifié (sans qu'il ne subsiste de l'eau résiduelle sur la plaque). Pendant le remplissage, le moule est appuyé fermement sur la plaque de base. Au moyen d'une main écope, on fait introduire le mortier dans le moule en trois couches d'épaisseurs équivalentes. Pour chacune des couches, on le pique 15 fois (pour le mortier ferme MT, sauf dans le cas de mortier autoplaçant ou fluide) à l'aide de la tige de piquage métallique, en répartissant les enfoncements sur la surface du mortier et en faisant pénétrer la tige dans la couche sous-jacente s'il y a lieu. On arase, en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule.

Il faudra éviter pendant cette opération un compactage supplémentaire du mortier. Puis on soulève le cône le plus verticalement possible en 2 secondes, avec précaution, lentement et sans secousses. Après démoulage, on procède dans la minute à la lecture de l'affaissement au centre de la partie supérieure du mortier à l'aide d'une règle métallique gradué en cm.

III.6.4.2 Essais d'étalement au mini-cône pour les mortiers fluide (MBAP) :

La mesure de l'étalement s'effectue sur les mortiers fluides à autoplaçants selon deux diamètres orthogonaux la valeur de l'étalement est la moyenne de ces valeurs. Ces procédures sont valables à toutes les échéances retenues. Pour les suivis rhéologiques dans le temps, remettre après essai un maximum de mortier dans le bol du malaxeur.

III.7 Etude rhéologique multi-échelle :

Le béton peut être considéré comme une suspension brute de particules avec des dimensions de la taille submicronique, par exemple, ciment et d'autres particules fines, aux millimètres de taille comme les agrégats. En conséquence, les propriétés rhéologiques du béton sont régies par les diverses forces, c.-à-d., non seulement par les forces d'origine colloïdale, mais aussi par des forces agissant entre les différents constituants (Safi, 2012). Puisque le béton est une suspension de particules, il peut être divisé en phase liquide et en phase solide. Il est commun de considérer la pâte de ciment ou le ciment faisant une partie des granulats fins. Normalement, les fractions $< 125\mu\text{m}$, ou $< 250\mu\text{m}$, sont considérées comme phase liquide et les agrégats comme phase solide du béton (Takafumi et col, 2009). Par une simplification, la pâte de ciment elle-même est une suspension de particules à un niveau "microscopique" dont la rhéologie est contrôlée par les mêmes lois que n'importe quelle autre suspension de particules fines.

III.8 Bilan :

Les mortiers frais, comme le béton frais, se comportent comme corps de *Bingham*, et les chercheurs ont montré que les effets de différents adjuvants et Additions sur les performances des mortiers sont semblables à ceux observés avec le béton et des essais faits sur des mortiers peuvent être employés pour choisir le système ciment-adjuvant-Addition, compatible et pour prévoir le comportement du béton dans différentes conditions technologiques (Amouri, 2009). L'étude du comportement du béton et du mortier est plus complexe que celui de la pâte. Sa théorie est encore peu explorée et nécessite plus d'investigation et de recherches théoriques et expérimentales.

IV. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 1:

ACKER P., 1988 : « Les principaux mécanismes physico-chimiques », *in* comportement mécanique du béton : apports de l'approche physico-chimique, Rapport de recherche LPC N°152. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Pages 1-34, France.

AMOURI C., 2009 : « Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) ».Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine.

ASSIÉ S., 2004 : « Durabilité des Bétons Autoplaçants ».Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, France.

BENSEBTI S.E., 2008: « Formulation et propriétés des Bétons Autoplaçants à base de matériaux locaux». Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine.

CASSIER-SAUVAGE, CHANUT, ARNAUD, BOUTIN., 2000 : « Suivi rhéologique sur mortier de béton équivalent calcul de composition essais rhéologique », Projet national CALIBE, France.

CURCIO F, DEANGELIS BA, PAGLIOLICO S., 1998: "Métakaolin as pozzolanic microfiller for high-performance mortars". Cement Concrete Research N°28(6), Pages 803.

CYR M., 1999 : « Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologiques des matrices cimentaires ». Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse, France.

DE LARRARD F., SEDRAN T., HU C., SZITKAR J.C., JOLY M., DERKX F., 1996: "Mix design of self compacting concrete",RILEM International Conference on production methods and workability of concrete, Pages 439-451, Glasgow.

DIERKENS M., 2005 : "Mesures rhéologique et modélisation de matériaux en cours de prise".Thèse de Doctorat, L'Ecole Nationale des Travaux Publics de L'Etat, France.

DOMONE P., 2006: "Self-compacting-concrete: An analysis of 11 years of case studies", cement and concrete composites, Volume 28, Issue 2, Pages 197-208.

HILALI A., 2009 : « Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) : Influence des fines calcaires et des fibres végétales ».Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France.

HU C., « Rhéologie des bétons fluides », Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA 16, 203 p., Paris, France, 1995.

LOUKILI A., 2001 : “Les bétons autoplaçants ”, Hermes Science publication, Lavoisier, France.

NEMATI K., 2008: “Relationship between the compressive strength and modulus of elasticity of high-strength concrete”, I CCBM- International Workshop, Karachi, Pakistan, C Pages 159-172.

OKAMURA H. & OUCHI M., 1999: “Self-compacting concrete, development, present use and future”, In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete.RILEM.

OKAMURA H. & OZAWA K., 1995: “Mix design for self compacting concrete”, Concrete library of JSCE, Volume 25, Pages 107-120.

OKAMURA H., OZAWA K., & OUCHI M., 2000: «Self-compacting concrete. » Structural Concrete, Volume1, Pages 3-17.

SAFI B., 2012: « Formulation et Caractérisation Rhéologique et physico-mécanique des pâtes cimentaires et mortiers autoplaçants ».Thèse de Doctorat, Université M’Hamed Bougara, Boumerdes.

SCHWARTZENTRUBER A. & CATHERINE C., 2000 : « La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) – Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés », Matériaux et Constructions, Vol. 33, pages 475-482.

SIAD H., 2010 :«Influence du type d’addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants ». Thèse de Doctorat, Institut National des sciences appliquées de Rennes, France.

SOUALHI H, KADRI E.H, NGOT-T, BOUVET A., CUSSIGH F., KENAT S., 2014: “A vane rheometer for fresh mortar: Development and validation”, Applied rheology, 24-22594.

C H A P I T R E 2

MECANISMES & CARACTERISATION DU RETRAIT

Dans ce chapitre, nous avons essayé de mettre en évidence les différents types de retrait et ses mécanismes tout en précisant les différents essais utilisés au niveau des laboratoires de recherche, pour estimer la valeur du retrait.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 2 :

I. INTRODUCTION :	33
II. LES FORMES DE RETRAIT :	34
III. MECANISMES A L'ORIGINE DU RETRAIT PLASTIQUE :	38
IV. PARAMETRES AFFECTANT LE RETRAIT :	43
V. INFLUENCE DE LA FORMULATION SUR LE RETRAIT :	43
VI. MESURES DU RETRAIT PLASTIQUE :	47
VII. ETUDE DE LA FISSURATION A L'ETAT FRAIS :	53
VIII. MESURE DE L'EVAPORATION :	56
IX. ESSAIS PHYSICO-MECANQUES SUR LES MORTIERS DES BETONS AUTO-PLAÇANTS :	56
X. BILAN :	58
XI. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 2 :	59

I. INTRODUCTION :

L'objectif de ce chapitre est d'établir un état des connaissances actuelles sur les recherches consacrées à l'étude du retrait des Bétons Auto-Plaçants. Le retrait des BAP est parfois considéré supérieur à celui des bétons classiques, à cause du volume de pâte et de la quantité de ciment élevés (Rozière, 2007). Cependant les nouvelles générations des BAP avec moins de ciment et plus d'additions rendent cette classification inappropriée, d'où la nécessité d'une compréhension plus avancée du phénomène.

Les variations dimensionnelles de retrait que subit la pâte de ciment (et donc le béton) sont relatives à la formation progressive des hydrates (hydratation du ciment) et à la dessiccation (mouvement d'eau à partir du matériau cimentaire vers le milieu ambiant dû à un gradient d'humidité), (Modjabi, 2010).

A l'état frais, le béton connaît une contraction de son volume, désignée de manière générale par retrait plastique.

Les déformations du retrait peuvent créer des fissurations, et ainsi porter les conditions d'une pénétration des agents agressifs externes favorisant, entre autres pathologie, et la corrosion des armatures (Zreiki, 2009).

Ce retrait a lieu avant la prise du ciment, à un moment où la pâte est encore déformable. Il se produit lorsque le flux d'eau évaporée au niveau de la surface est supérieur au flux d'eau ressuée (Wittmann, 1976), ceci, surtout au moment de la pré-prise où l'on observe une nette diminution du ressuage. Le retrait plastique se caractérise alors par une diminution de volume qui peut conduire à une fissuration, d'autant plus qu'avant la prise, le béton n'a pas encore développé une grande résistance à la traction.

Les fissures de retrait plastique sont peu profondes, ces fissurations sont la conséquence du retrait endogène, contraction d'origine chimique, de grande amplitude chez les bétons de rapport E/C inférieur à 0,4, même si les BAP ont en général un rapport E/C supérieur à cette valeur, et ont, a priori, un faible retrait endogène. La durée du retrait plastique est d'autant plus courte que l'autodessiccation est rapide, parce que l'hydratation crée des produits solides qui augmentent la consistance de la pâte et diminuent la connectivité de la phase liquide (Aouad, 1998).

Nous désignerons ici par retrait plastique la contraction totale du béton, "somme" du retrait endogène et du retrait de séchage, pendant la phase plastique. Cette dernière est la période s'écoulant entre la fabrication et le début de prise, période pendant laquelle le béton ne présente pas de cohésion. Mais, comme le début de prise est difficile à mesurer pour un béton,

les mesures de retrait plastique disponibles dans la littérature englobent très souvent la contraction totale pendant la prise (Turcry, 2004).

Le retrait plastique est défini au final comme la contraction totale du béton entre la fabrication du béton et la fin de prise (figure 2.1).

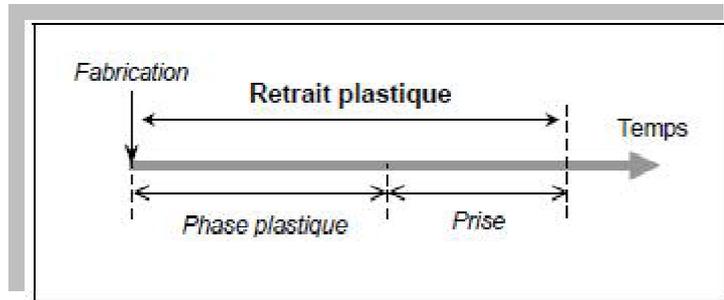


Figure 2.1: Définition du retrait plastique.

II. LES FORMES DE RETRAIT :

Le retrait des matrices cimentaires est un processus relativement complexe, on a pris pour habitude de le composer en différents types (Aitcin et col, 1998): le retrait plastique, de séchage, thermique, de carbonatation et endogène. Ces composantes du retrait total d'une matrice cimentaire sont cumulatives, mais elles ont des cinétiques très différentes. Le retrait total peut conduire à la fissuration des éléments en béton. Après la prise, le béton, qui est devenu un solide poreux, va continuer de subir des déformations, ces déformations sont nombreuses et parfois multiples pour un même type de retrait.

II.1 Retrait au très jeune âge (retrait chimique) :

Au moment du mélange du ciment avec l'eau, le retrait d'hydratation ou retrait chimique (à ne pas confondre avec le retrait hydraulique, ni avec le retrait de dessiccation) se produit par contraction ; c'est pourquoi, d'autres auteurs le nommeront « retrait de serrage avant prise» (Coquillat, 1987). Ce premier retrait, mis en évidence par Le Chatelier en 1894 d'où la dénomination « Contraction de Le Chatelier » illustré sur la figure 2.2, résulte d'une diminution du volume (8 à 12 % du volume initial) de la pâte formée par rapport à la somme des volumes absolus des anhydres et de l'eau (Acker, 1988 ; Acter, 1992).

En effet, dans la réaction d'hydratation du ciment, la matrice cimentaire se contracte et le volume des hydrates formés V_h est inférieur à celui du ciment anhydre V_a et au volume d'eau consommé V_e . Ceci peut être représenté mathématiquement par l'équation suivante :

$$\Delta V = V_h - (V_e + V_a) \quad (2.1)$$

ΔV : est la diminution du volume.

Avant la prise de la pâte de ciment, il est possible d'observer un retrait d'évaporation ou retrait plastique. La limitation de ce retrait est souhaitée par des solutions de cure pour éviter une perte en eau excessive conduisant au phénomène pathologique de ressuage et à un prématuré de l'hydratation. En conséquence, une faible résistance du béton et une durabilité limitée à long terme seraient obtenues (Audenaert et De Schutter, 2002 cité par Benkechkach, 2007). Ce syllogisme est évidemment une source de fissuration excessive au sein du matériau car l'amplitude du retrait plastique est très importante comparée à celle du retrait hydraulique (ou retrait endogène) et dépend de la géométrie de l'ouvrage. C'est le problème des bétons mis en place longtemps après gâchage et qui possèdent un retardateur de prise. La durabilité de ce type de béton est largement moins importante devant celle d'un béton gâché et mis en place immédiatement.

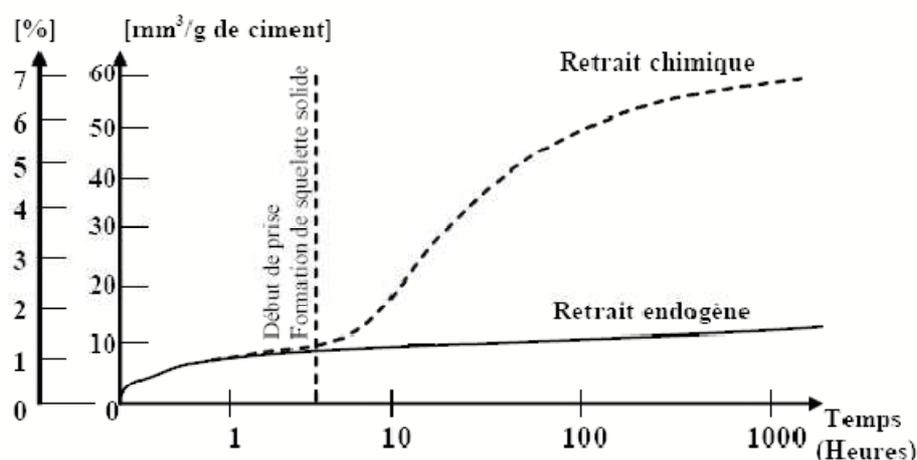


Figure 2.2: Mesure du retrait chimique (Jensnes, 2005 cité par Zreiki., 2009).

II.2 Retrait endogène (d'autodessiccation) :

Après la phase d'hydratation, le mélange « eau - ciment » à l'état de suspension se raidit, c'est la prise. Il se constitue une étroite où les particules de ciment se soudent, formant entre eux des ponts cristallins (figure 2.3 (a)). Cette étape coïncide avec le début du retrait hydraulique ou plus communément « retrait endogène », même si de nombreux hydrates de ciment ont déjà été formés dès le mélange (Acter, 1992). Ce retrait est aussi qualifié de retrait d'autodessiccation. En effet, le squelette minéral formé après la prise s'oppose à la diminution de volume de l'hydratation croissante au sein de la pâte de ciment. La mise en pression du système cristallin conduit à la cavitation des pores et à un dégagement gazeux analogues à un départ d'eau.

Le retrait endogène est également influencé par le nombre et le type de granulats car, à l'interface « pâte - granulat », il est empêché par les granulats qui créent des zones de concentration de contraintes où vont se former les premières fissures (figure 2.3 (b)) (Pane et Hansen, 2002 ; Smadi et Slate, 1989). Un béton de granulats calcaires concassés donnera un plus fort retrait qu'un béton de granulats quartzeux ou de granulats roulés. Enfin, un ratio E/C plus faible produit un retrait endogène plus important (Pane et Hansen, 2002).

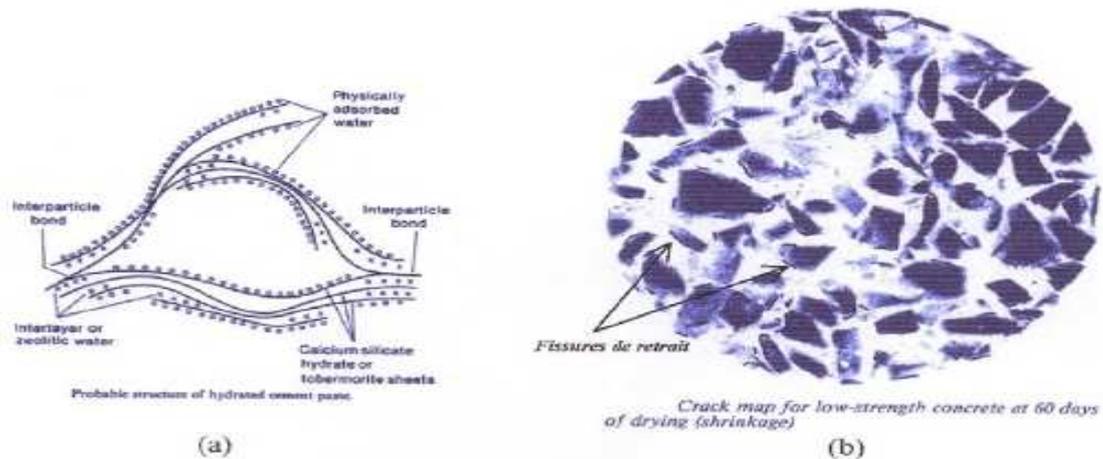


Figure 2.3 : (a) Ponts cristallins lors de la prise (Neville et col, 1983) ;
 (b) : Localisation de fissure de retrait sur la coupe d'une éprouvette (Smadi et Slate, 1989).

Le retrait endogène est un des processus intrinsèques du béton car il ne dépend que des propriétés du matériau (Aitcin, 2001). Par exemple, les composants du ciment C_3S et en particulier, C_3A , provoquent d'importants dégagements de chaleur lors de l'hydratation. Ils accélèrent le retrait dont on peut diminuer l'amplitude en réduisant principalement la teneur en C_3A .

II.3 Retrait thermique :

Les réactions d'hydratation libèrent en fin de prise une certaine quantité de chaleur. Un élément en béton subit alors un échauffement, fonction des conditions d'échange avec le milieu extérieur. En découle une dilatation, suivie d'une contraction, qualifiée de retrait thermique, lorsque sa température diminue jusqu'à la température ambiante. A première vue, le retrait thermique ne devrait pas avoir de conséquence pour le béton, car la contraction n'est que le retour au volume initial, d'avant la dilatation (si, bien sûr, le coefficient de dilatation thermique est supposé constant). Cependant, les propriétés mécaniques évoluent très vite au jeune âge. Le module élastique, en particulier, est plus grand pendant la phase de

refroidissement. Lorsque le refroidissement débute, le béton se contracte, alors que la prise a été déjà faite. La rigidité du béton limite la déformation et les contraintes de traction commencent à se développer. Le retrait observé peut entraîner des fissurations, lorsque les déformations de traction dépassent la limite en traction (Acter, 1992).

L'élévation de température engendrée par les réactions d'hydratation dans la pièce coulée est d'autant plus importante que sa taille est importante, car la dissipation d'énergie se fait moins bien à cause de la grande distance par rapport à la surface et l'augmentation de la température entraîne une accélération de l'hydratation par thermoactivation, ce qui stimule la vitesse de production de chaleur. Le risque de fissuration existe lorsque la contraction thermique d'une pièce de béton est gênée ou empêchée.

II.4 Retrait dessiccation (séchage):

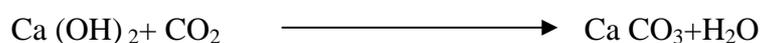
Le retrait de dessiccation ou retrait de séchage par définition, se traduit par un départ d'eau inhérent à l'équilibre hydrique du matériau avec l'atmosphère ambiante non saturée et ce, dès la mise en place du béton. Il possède une amplitude très importante devant les autres retraits. La contraction produite permet l'évaporation de l'eau en excès, nécessaire uniquement au malaxage du béton frais et dépend donc, de la teneur en eau de la composition du béton. Le retrait de séchage est notamment diminué si la proportion « granulats/pâte de ciment » augmente (Bissonnette et Pigeon, 2000).

Ce retrait hydrique n'est pas un processus intrinsèque du béton car les transferts hydriques du cœur de l'élément vers l'extérieur, amènent à considérer la taille et de la géométrie des éléments. En particulier, de forts gradients hydriques sont maintenus longtemps au voisinage de la surface (Acker, 1988).

II.5 Retrait de carbonatation :

A la surface d'un béton, la pâte de ciment peut réagir avec l'eau et le gaz carbonique de l'air ambiant. Cette réaction, la carbonatation, s'accompagne d'une contraction volumique. La peau du béton peut en conséquence se fissurer : on parle de faïençage (Boukni, 2007).

Lors de la réaction de carbonatation, les composés calciques issus de l'hydratation, principalement la Portlandite, réagissent avec le dioxyde de carbone de l'air pour donner du carbonate de calcium et de l'eau conformément au schéma réactionnel simplifié suivant :



La transformation cristallographique de la Portlandite en calcite s'accompagne d'une légère diminution du volume.

La carbonatation agit surtout en surface à cause de la présence du gaz carbonique dans l'air. Ainsi, pour les bétons ordinaires, on remarque que ce ne sont que les premiers centimètres qui font l'objet de cette réaction, même après plusieurs années. La réaction de carbonatation varie avec l'humidité du béton et l'humidité relative (l'optimum de la cinétique de carbonatation se trouve aux alentours de 65%). La diffusivité peut aussi être influencée par la présence de fissures. Le retrait de carbonatation est proportionnel au retrait de dessiccation (Baron, 1982) Dans la plupart des cas, ce retrait est négligeable voire nul.

III. MECANISMES A L'ORIGINE DU RETRAIT PLASTIQUE :

Pour illustrer les mécanismes, nous prenons l'exemple d'une pâte de ciment à l'état frais, dont la surface sèche (figure 2.4 (a)).

III.1 Le tassement :

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 2.4 (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 2.4 (c).

Même si la période avant la prise est dite dormante, les réactions d'hydratation commencent dès la mise en contact de l'eau et du ciment. 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" (Turcry, 2004).

III.2 Retrait de séchage :

A un instant donné, l'épaisseur de la couche d'eau ressuée dépend de la vitesse de consolidation, mais également du taux d'évaporation. Dans le cas où l'eau s'évapore plus vite à la surface qu'elle n'y apparaît, il se forme un système complexe de ménisques entre les grains solides (figure 2.4 (d)).

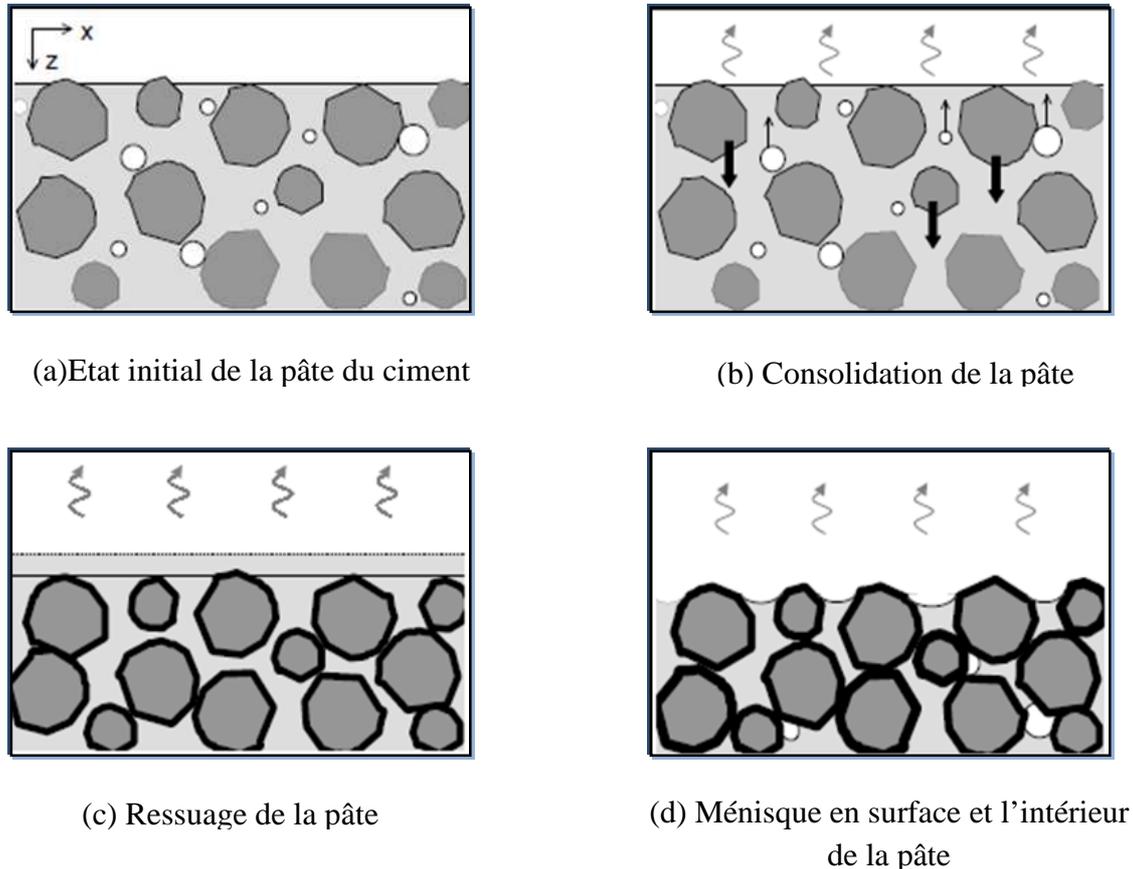


Figure 2.4 : Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment.

Selon la relation de Laplace (2.2), la variation de pression de l'eau, consécutive à la formation d'un ménisque, est négative. La pression capillaire p est proportionnelle à la tension de surface de l'eau σ , à l'angle de mouillage θ , et au rayon du pore r .

$$p = - (2\sigma/r) \cos \theta \quad (2.2)$$

La figure 2.5 présente l'évolution théorique de la pression de l'eau, à la profondeur z dans la pâte de ciment (Hammer, 2002). A l'instant initial, la pression est égale à :

$$p_1 = \rho_{\text{pâte}} g z \quad (2.3)$$

Où : $\rho_{p\grave{a}te}$ est la masse volumique de la suspension.

A l'âge t_1 , quand la consolidation se termine, le squelette granulaire supporte son propre poids, la pression est égale à la pression hydrostatique :

$$p_2 = \rho_{eau} g z \quad (2.4)$$

Durant l'intervalle (t_1-t_2) , la pâte est recouverte d'eau de ressuage. A l'âge t_2 , l'évaporation provoque la création de ménisques en surface. La durée de l'intervalle (t_1-t_2) est bien sûr fonction du taux de séchage et de la vitesse de ressuage : les ménisques peuvent aussi bien apparaître avant l'âge t_1 .

Les mesures de pression capillaire présentent typiquement un saut au bout d'un temps donné, noté t_{max} sur la figure 2.5.

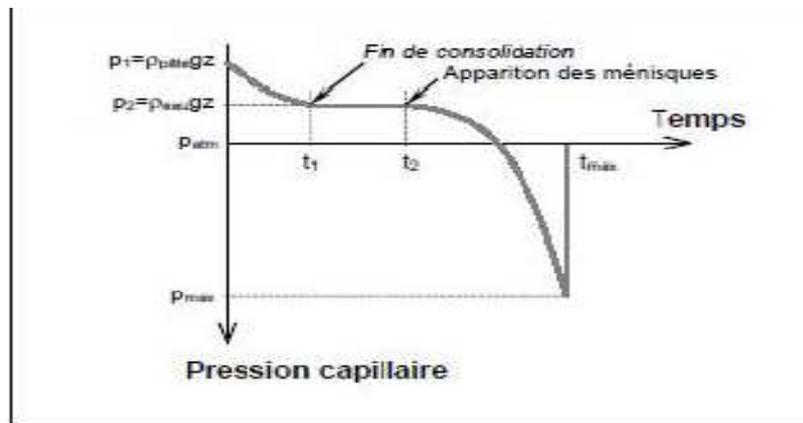


Figure 2.5 : Evolution théorique de la pression de l'eau dans une pâte de ciment (Hammer, 2002).

III.3 Retrait d'autodesiccation :

Trois mécanismes permettant d'expliquer le retrait d'autodesiccation, ils correspondent respectivement au départ de l'eau des pores capillaires, à celui de l'eau adsorbée et à celui de l'eau des hydrates :

- Le retrait par variation de la dépression capillaire.
- Le retrait par variation de la tension superficielle du solide, due à la diminution de l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée.
- Le retrait par variation de la pression disjonctive liée aussi à une diminution de la couche d'eau adsorbée.

III.3.1 Le retrait par variation de la dépression capillaire :

Le mécanisme de retrait par dépression capillaire peut être décrit à partir des équations de Laplace et de Kelvin, qui décrivent respectivement l'équilibre mécanique d'un ménisque sous des dépressions différentes, et l'équilibre hygrométrique eau liquide – eau vapeur (figure 2.6). Elles indiquent que le ménisque existe si la différence des dépressions des deux côtés est compatible avec une humidité donnée (h).

Loi de Laplace :

$$P_g - P_l = (2\sigma/r) \cos\theta \quad (2.5)$$

Avec :

P_g : pression de phase gazeuse air humide (air sec + vapeur d'eau) exprimée en Pa,

$$P_g = P_a + P_v,$$

P_a : pression partielle d'air sec (Pa),

P_v : pression partielle de vapeur d'eau (Pa),

P_l : pression de l'eau liquide,

σ : tension superficielle de l'interface liquide/gaz ($N.m^{-1}$),

r : rayon du pore où le ménisque existe (m),

θ : angle de mouillage (rad).

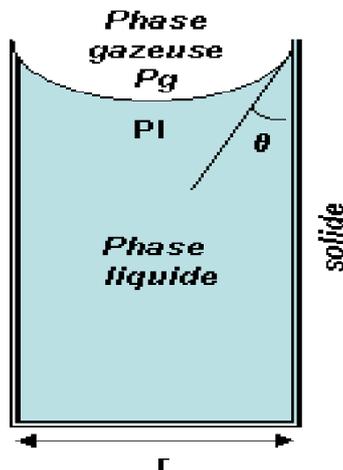


Figure 2.6 : Présentation schématique de la dépression capillaire.

Loi de Kelvin :

$$P_l - P_g = (RT\rho_l / M) \ln (HR) \quad (2.6)$$

Avec :

M : masse molaire de l'eau (kg mol^{-1}),

R : Constante des gaz parfaits ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$),

T : température absolue (K),

ρ_l : masse volumique de l'eau (kg m^{-3}),

HR : humidité relative (%), avec : $HR = P_v / P_{vs}$

P_{vs} : pression de vapeur saturante.

A partir des lois de Laplace et de Kelvin, il est possible de lier l'intensité de la dépression capillaire ($P_g - P_l$), le rayon du pore dans lequel se situe le ménisque et l'humidité de la manière suivante :

$$\Delta P = P_g - P_l = (2\sigma/r) \cos\theta = - ((RT\rho_l)/M) \ln(HR) \quad (2.7)$$

III.3.2 Le retrait par variation de la tension superficielle du solide :

La tension superficielle des solides et des liquides est la résultante de la dissymétrie des forces d'attraction que subissent les atomes au voisinage de la surface.

Selon le mécanisme de variation de tension superficielle, appliquée au retrait de dessiccation et étendu au retrait d'autodessiccation, l'adsorption d'eau sur le squelette solide provoque une relaxation de sa tension superficielle qui se traduit par un gonflement ; inversement, un départ d'eau adsorbée augmente la tension superficielle du squelette solide, il se produit alors un retrait (Mounanga, 2003).

III.3.3 Le retrait par variation de la pression disjonctive :

La pression disjonctive se développe dans la zone où l'adsorption de l'eau se trouve gênée, c'est-à-dire là où la distance entre deux surfaces solides est plus petite que deux fois l'épaisseur d'une couche d'eau adsorbée librement (Mounanga, 2003).

IV. PARAMETRES AFFECTANT LE RETRAIT :

Les paramètres qui affectent la cinétique et l'amplitude du retrait plastique sont :

- **Le retrait chimique** : L'amplitude de la contraction chimique dépend uniquement de la nature du ciment et de la vitesse d'hydratation .Le retrait chimique influe sur le retrait endogène.
- **Le ressuage** : Le retrait de séchage n'apparaît que si le ressuage est négligeable devant l'évaporation.
- **Le taux d'évaporation** : Il existe dans la littérature des formules permettant d'estimer le taux d'évaporation en fonction des conditions extérieures (Uno, 1998).
- **L'angle de frottement interne** conditionne la "naissance" de la déformation horizontale.
- **La géométrie et la taille des pores** contrôlent le développement de la pression capillaire créé par un départ d'eau.
- **Le module de retrait** relie déformation volumique et pression capillaire. Avant la prise, c'est la compressibilité du milieu granulaire. Après le début de prise, il représente la compressibilité du squelette.

V. INFLUENCE DE LA FORMULATION SUR LE RETRAIT :

Les données sur l'influence des paramètres de composition sur le retrait sont nombreuses dans la littérature et sont parfois contradictoires.

V.1 Effet du rapport E/C :

De nombreuses publications évoquent l'influence du rapport E/C sur le retrait, par exemple l'eau joue un triple rôle dans le mélange du béton, en plus de sa nécessité dans les réactions d'hydratation, elle permet aussi de mouiller les granulats pour lui assurer une adhésion avec la pâte. Une autre quantité d'eau doit rester libre dans le mélange pour assurer la maniabilité du mélange. Il est important de rappeler que les réactions d'hydratation n'ont besoin que de la moitié de l'eau d'un rapport(E/C=0.25).

Les chercheurs ont noté qu'en dessus d'un rapport E/C=0.4, l'hydratation n'occasionne pas de forte baisse d'humidité relative, donc pas de retrait important. Cependant, Bouasker (2007) a observé dans ses recherches que l'augmentation du rapport E/C réduit d'une manière significative le retrait d'autodessication, dans le même ordre d'idée, Rozière et col (2007) ont

remarqué que lorsque le rapport E_{eff}/C est au-delà de 0.54, le retrait endogène est très faible. Néanmoins, le retrait endogène est similaire pour le BAP et le Béton Ordinaire ce qui représente le même rapport E/C (Siad, 2010).

Hua et Col (1996), ont trouvé presque la même conclusion en étudiant l'influence du rapport E/C sans qu'il y ait contact avec une source d'eau externe. L'étude a donné que le retrait endogène est négligeable pour des rapports E/C élevés et très important pour des rapports E/C inférieurs à 0.4 (figure 2.7).

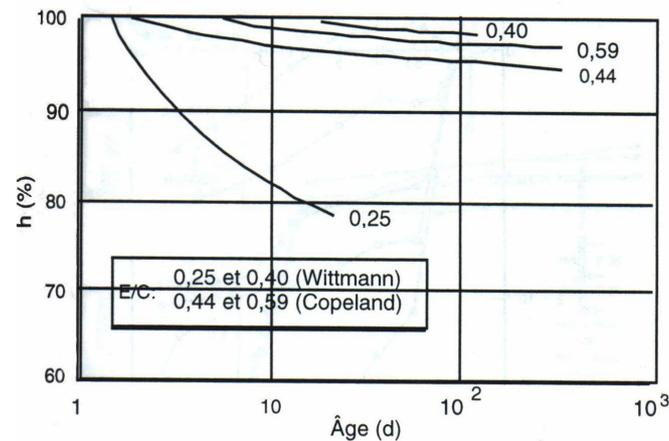


Figure 2.7: Influence du rapport E/C sur la valeur du retrait (Hua et Col, 1996).

Par ailleurs, la taille des pores, et donc le rayon des ménisques à la surface diminue avec le rapport E/F , en conséquence, le retrait de séchage se trouve augmenté lorsque ce rapport diminue (Turcry, 2004).

V.2 Effet du volume de la pâte :

Le retrait est une fonction croissante du volume de pâte, parce que les granulats ne connaissent pas de retrait. Le volume de pâte est un paramètre majeur contrôlant le retrait du béton. Son influence est plus grande que le rapport E/C . En plus, l'influence devient encore plus significative lorsqu'une circulation d'air est appliquée à la surface des échantillons (Loukili, 2011).

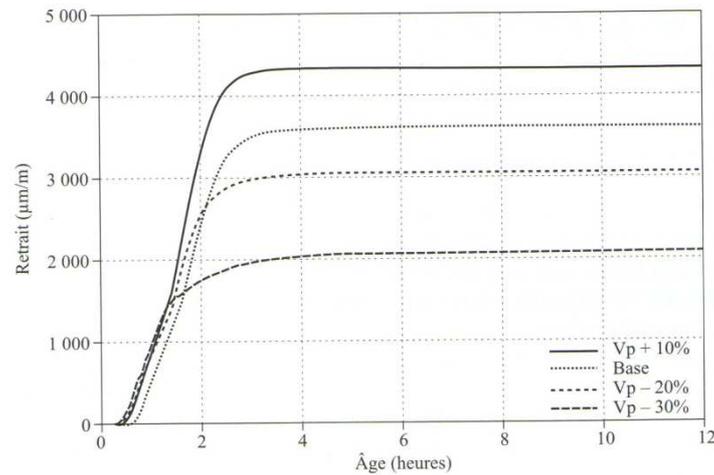


Figure 2.8 : Retrait plastique de bétons avec 4 fractions volumiques de patte différentes (de - 30 à + 10% par rapport à la composition de base)-cas d'un séchage forcé (Loukili, 2011).

V.3 Effet de la masse du ciment ou des fines :

Pour un rapport E/F ou E/C donné, l'augmentation de la masse de ciment ou de fines provoque l'augmentation du retrait plastique, parce que les efforts capillaires ont lieu au sein de la pâte.

V.4 Effet des additions :

La proportion d'additions minérales peut également avoir une influence, dépendant de la nature et de la finesse de l'addition utilisée (Turcry, 2004).

Le retrait plastique augmente avec la finesse de l'addition ou du ciment, car la taille de la porosité capillaire est directement proportionnelle à la finesse des constituants (Loukili, 2011).

Alrifai et col (2008), ont remarqué que le retrait endogène des mortiers issus des BAP croît quand le pourcentage en fillers calcaires décroît.

En parallèle certains chercheurs ont trouvé que le retrait endogène et total des BAP formulés avec des cendres volantes est plus grand que celui des BAP à base de fillers calcaires lorsque le rapport E/Lequi est très proche.

Khatib (2007), a pu réduire significativement le retrait total avec l'utilisation d'un pourcentage élevé de cendres volantes dans les BAP.

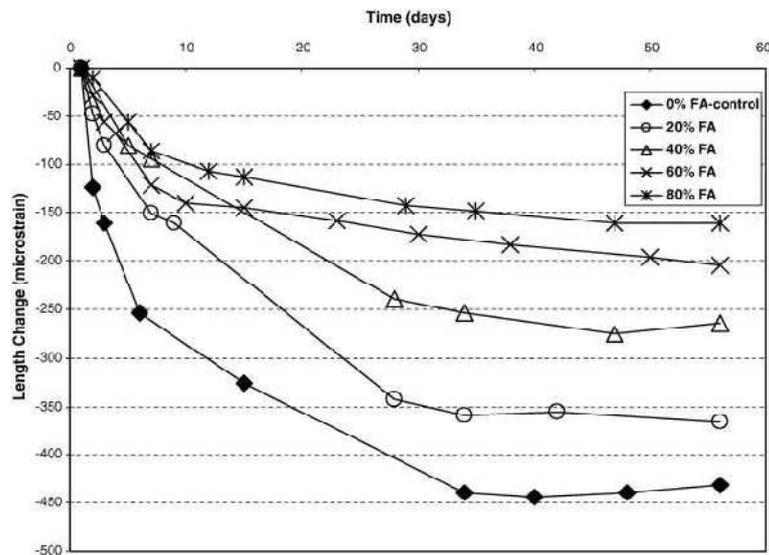


Figure 2.9: Influence de la cendre volante sur le retrait (Khatib, 2007).

La même conclusion a été trouvée par Koehler (2007) qui a expliqué le phénomène par la faible demande en eau des cendres volantes.

V.5 Effet des adjuvants :

L'amplitude du retrait plastique augmente avec le dosage en superplastifiant car l'adjuvant retarde la naissance du squelette solide s'opposant aux efforts capillaires (Turcry, 2004).

V.6 Effet de la concentration granulaire :

L'influence de la concentration des granulats sur le retrait a été étudiée par plusieurs chercheurs. Baron (cité par Bouasker M., 2007) a montré que le retrait d'un béton est de 6 à 10 fois plus petit que celui de la pâte de ciment correspondante. En effet, l'augmentation de la fraction granulaire dans l'échantillon diminue le retrait endogène à cause du principe que les granulats sont très peu déformable. Toute fois, un volume de gravier sous dimensionné, comme c'est le cas des BAP, peut conduire à des problèmes de retrait (El Barrak, 2005). Par contre, il est à noter que les granulats secs, ont tendance à absorber une partie de l'eau de gâchage, les forces capillaires deviennent plus fortes et génèrent un retrait plus élevé.

Par ailleurs, si les granulats sont poreux, ils emmagasinent l'eau et la rediffusent plus tard dans la pâte de ciment quand l'eau de gâchage n'est plus disponible pour l'hydratation (cure interne). Les granulats jouent le rôle de réservoir d'eau au cours de l'hydratation et limitent l'effet de l'autodessiccation (Bouasker, 2007).

Le retrait plastique n'est toutefois qu'un facteur du phénomène de fissuration. La capacité de déformation est aussi une caractéristique du béton qui conditionne l'apparition de fissures. Or les BAP se distinguent principalement des bétons ordinaires par leurs propriétés rhéologiques. Malheureusement, aucune étude n'a encore fait le lien entre rhéologie et capacité de déformation. C'est pourquoi, à la suite de l'étude du retrait plastique, nous avons opté pour une approche plus directe de la fissuration, à l'aide de dispositifs de retrait empêché.

VI. MESURES DU RETRAIT PLASTIQUE :

La mesure du retrait chimique peut se faire par pesée hydrostatique d'une fine couche de pâte en contact avec l'eau du bain (Boivin, 1999). Le taux d'évaporation se détermine par suivi de la masse du béton qui sèche.

Les études expérimentales du retrait plastique se focalisent sur la mesure du retrait proprement dit. Les techniques de mesure sont de deux types.

Mesure linéaire : On mesure le déplacement dans la direction horizontale d'un échantillon de pâte, mortier, ou béton, placé dans un moule prismatique (Kronlöff et col, 1995). Lorsque sa surface est laissée à l'air libre, en ambiance contrôlée, le déplacement correspond au retrait total, résultat du séchage et de l'hydratation. Lorsque l'évaporation est empêchée, il correspond au retrait endogène, parasité par des déformations thermiques si la température du matériau ne reste pas constante en cours d'essai. Le dispositif est souvent pourvu de capteurs mesurant le déplacement vertical, ou le tassement de l'échantillon.

Mesure volumique : Comme le retrait chimique, le retrait endogène peut être mesuré par pesée hydrostatique. Dans ce cas, la pâte de ciment (ou le mortier) est placée dans une membrane souple (Turcry et col, 2002). Depuis quelques temps, cette méthode fait l'objet de débats, car le retrait mesuré ainsi n'est pas égal au retrait mesuré avec les méthodes dites linéaires (Barcelo et col, 1999). Malgré les artefacts expérimentaux suspectés, elle permet tout de même d'analyser de manière qualitative le comportement du matériau.

Essais complémentaires : Les essais sur le retrait plastique sont souvent accompagnés d'autres mesures, par exemple des mesures de la pression capillaire et du temps de prise.

VI.1 Mesures linéiques :

Le principe de la mesure linéique consiste à enregistrer les variations dimensionnelles d'une éprouvette dans une direction horizontale et une autre verticale. Les résultats sont exprimés sous la forme suivante :

$$\varepsilon = (L - L_0) / L_0 \quad (2.8)$$

Avec :

L : la longueur de l'éprouvette à l'instant de la mesure,

L_0 : la longueur initiale.

La mesure du retrait s'effectue selon les deux normes NF EN 1367-4 et NF EN 12617-4 sur des éprouvettes prismatiques, de dimensions $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ pour les bétons et $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ pour les mortiers, équipée de plots métalliques à chaque extrémité. L'éprouvette est placée verticalement entre deux billes métalliques, et un comparateur est utilisé pour le suivi de la variation de la longueur (figure 2.10). Ce dernier a des graduations de 0.001 mm et ayant une erreur maximale de $\pm 0.001 \text{ mm}$ pour un demi tour.



Figure 2.10 : Le rétractomètre pour la mesure linéique.

De nombreux chercheurs ont travaillé sur cette méthode de mesure Baroghel (1994), et Le Roy (1996). Cette méthode est dérivée de la norme NF P 15-433 (cité par Mitani, 2003) : les éprouvettes sont coulées dans un moule métallique permettant d'équiper chaque éprouvette de plots métalliques à ses deux extrémités. Après démoulage, les éprouvettes sont recouvertes de deux couches de papier aluminium adhésif. Ensuite, les mesures sont effectuées verticalement. La longueur de référence est considérée comme la longueur au moment du démoulage. Ce type de mesure est recommandé par le « Technical committee on autogenous shrinkage of concrete » édité par Tazawa (1998). Il est à signaler que Le Roy (1996) utilise des moules en Téflon fermés à leur extrémités, après le démoulage et protection contre la dessiccation, la mesure se fait avec deux LVDT (figure 2.11).

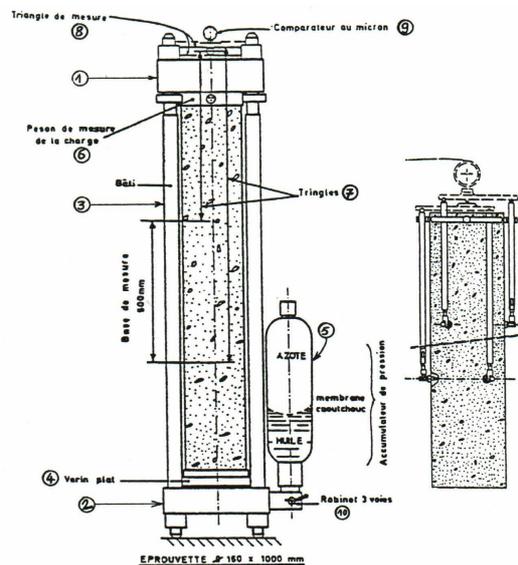


Figure 2.11 : Dispositif expérimentale utilisé par Le Roy (1997) mesure linéique horizontale.

Un autre dispositif a été utilisé par Bouasker (2007), pour la mesure linéique (figure 2.12), son principe est basé sur l'utilisation d'une manchette ondulée en PVC noir moulé. Ce type de manchette (figure 2.13), est parfaitement étanche, ce qui permet de bien isoler le matériau et de travailler dans l'hypothèse d'un système fermé (aucun échange d'eau ni d'humidité avec le milieu extérieur). En plus de leur souplesse, les ondulations empêchent tout risque de glissement entre le matériau coulé à l'intérieur et la manchette. Le déplacement mesuré est donc celui de la manchette et de l'échantillon à étudier.

Lors de la mise en place du matériau dans la manchette, il faut éviter au maximum la formation de bulles d'air, en vibrant la manchette, pendant 60 secondes, après avoir introduit

l'échantillon. La manchette est entourée à ces deux extrémités par un ruban élastique permettant de sceller l'éprouvette.

A chaque embout de l'éprouvette, sont fixés des plots d'ancrage afin de suivre la déformation du matériau après la prise. Enfin, l'ensemble est placé sur deux tiges (figure 2.14) dans le cas du dispositif horizontal et entre quatre tiges de guidage pour le dispositif vertical (Figure 2.15). Les dispositifs sont immergés dans un bain d'eau thermostaté à une température constante de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ou $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

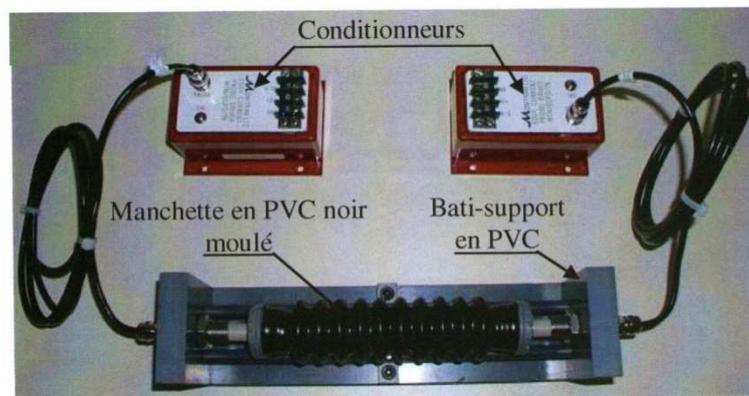


Figure 2.12 : Dispositif de mesure de retrait linéique horizontal.

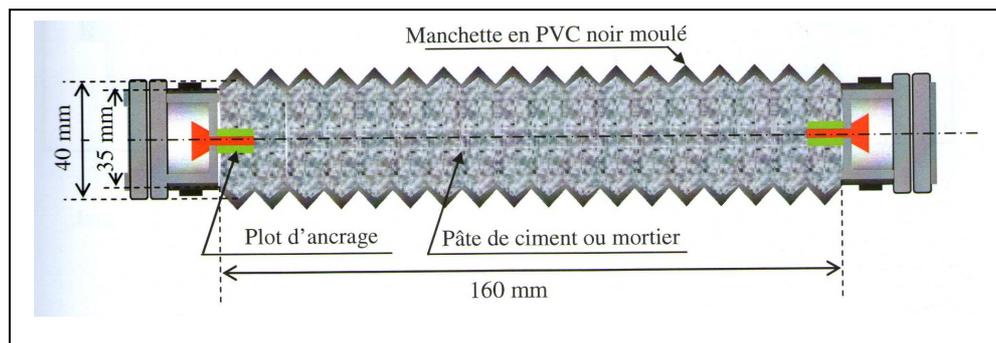


Figure 2.13 : Coupe longitudinale de la manchette en PVC.

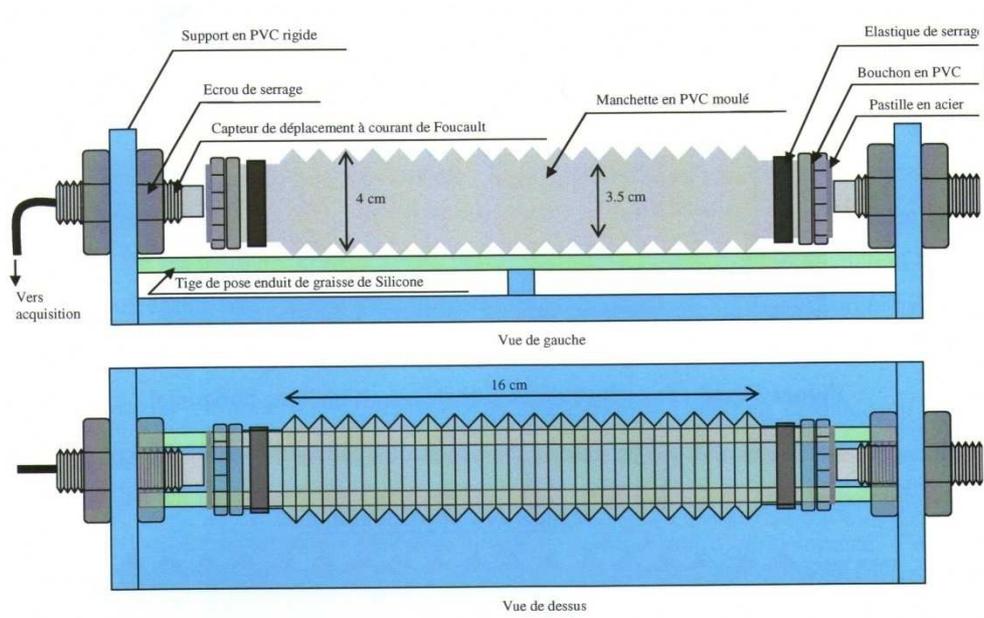


Figure 2.14 : Vues de gauche et de dessus du dispositif de mesure de retrait horizontal.

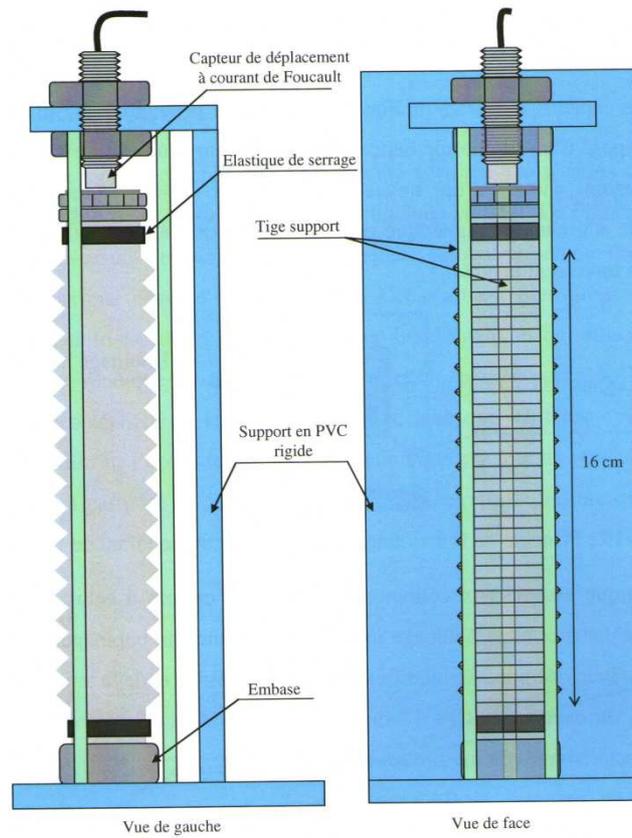


Figure 2.15: Vues gauche et de face du dispositif de mesure de retrait vertical.

VI.2 Mesures Volumiques :

Le principe général de ces méthodes consiste à mesurer la variation volumique d'un échantillon de matériau immédiatement après son coulage. Deux techniques de mesure existent dans la littérature : la mesure par suivi de niveau du liquide d'immersion et la mesure de la variation de volume par pesée hydrostatique.

VI.2.1 Le suivi du niveau du liquide d'immersion :

Le principe de cette méthode est d'isoler un volume de pâte de ciment dans une membrane, puis d'immerger l'ensemble dans un liquide (eau, mercure, huile de paraffine...). La déformation est déterminée par le suivi du niveau du liquide au cours de l'hydratation. Afin de suivre la déformation, Del Campo, (1959 cité par Bouasker, 2007) a utilisé une méthode où le matériau est mis dans une membrane en latex et l'ensemble est placé dans une cuve en acier inoxydable (figure 2.16). La cuve est ensuite remplie de mercure et la variation du niveau de mercure lui permet de remonter à la déformation de l'échantillon. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite un relevé manuel des mesures.

Setter et Roy (1978 cité par Bouasker, 2007) ont conçu un dispositif inspiré de Del Campo mais permettant un relevé automatique des mesures. L'échantillon est placé dans une membrane étanche plongée dans un récipient rempli d'eau et muni d'un tube souple. La partie supérieure du tube est suspendue à une balance reliée à un système d'acquisition automatique qui enregistre les variations du niveau du liquide (figure 2.17).

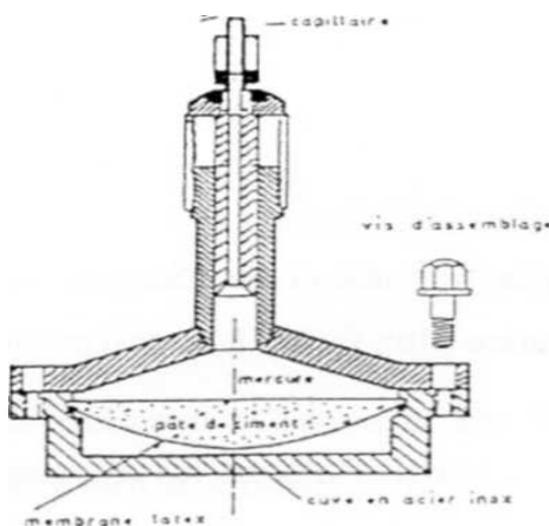


Figure 2.16 : Mesure de retrait externe par variation de niveau de mercure (Del Campo, 1959 cité par Bouasker, 2007).

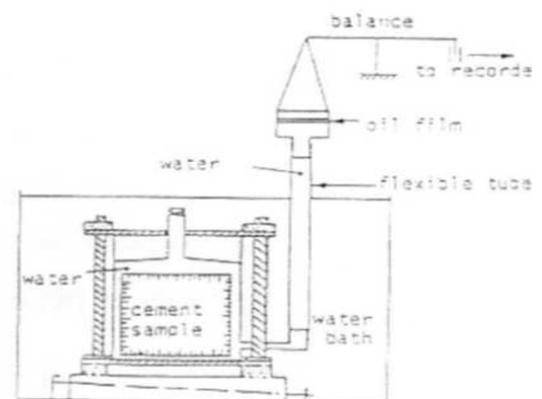


Figure 2.17 : Mesure de retrait externe automatisé (Setter et Roy, 1978 cité par Bouasker, 2007).

VI.2.2 La pesée hydrostatique :

La méthode consiste à introduire un échantillon de pâte de ciment ou de mortier dans une membrane étanche en latex ; l'ensemble est ensuite immergé dans un bain thermostaté, et relié à une balance par un fil (figure 2.18). La variation de volume se traduit par une variation de la poussée d'Archimède enregistrée par la balance.

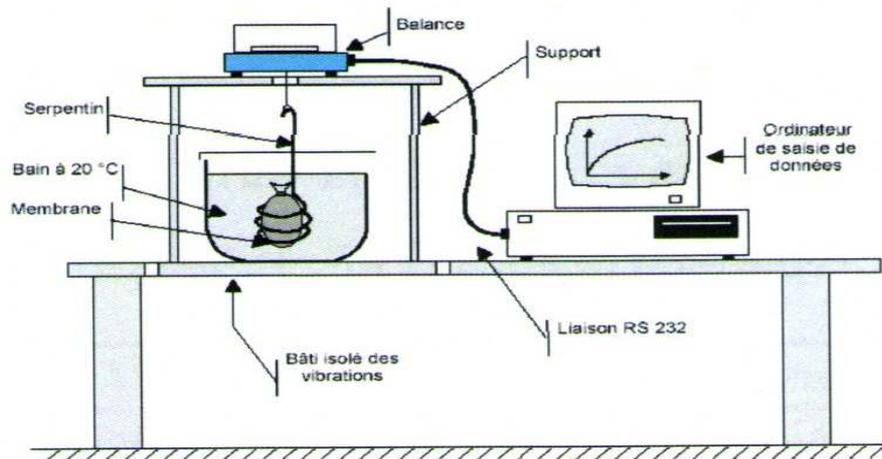


Figure 2.18 : Dispositif expérimental de mesure des variations volumiques (Mitani, 2003).

VII. ETUDE DE LA FISSURATION A L'ETAT FRAIS :

VII.1 Dispositif de fissuration pour béton :

Le dispositif de fissuration est composé d'un moule prismatique de longueur 40cm, de largeur 20cm et de hauteur 7cm. Trois sur élévations triangulaires sont placées au fond du moule pour initier la fissuration (figures 2.19 et 2.20) (Turcry, 2004).

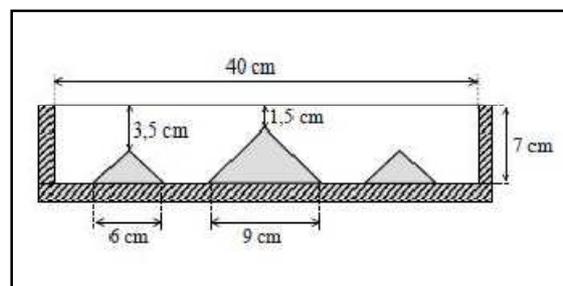


Figure 2.19 : Vue en coupe du dispositif de fissuration des bétons.

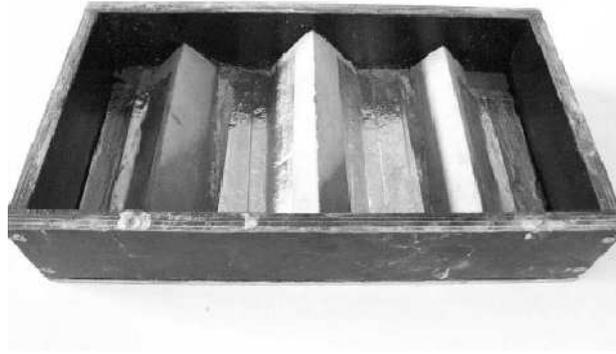


Figure 2.20: Dispositif de fissuration pour bétons.

VII.2 Dispositif de fissuration pour mortier :

Le dispositif de retrait empêché, figure 2.21, est inspiré de celui conçu par Soroushian et Ravanbakhsh (1998). Il est composé d'un moule carré (20x20cm) et de profondeur de 1 cm, ondulé à sa base pour orienter les fissures et les conduire sur la même direction rectiligne.

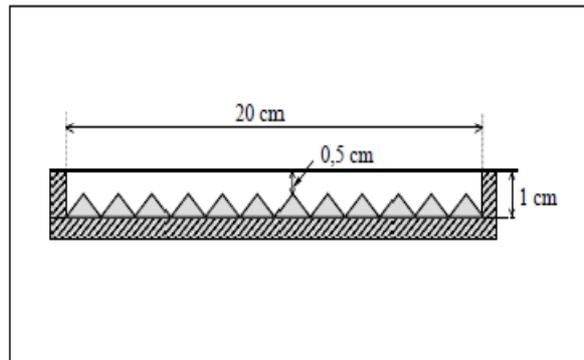


Figure 2.21: Vue en coupe du dispositif de fissuration des mortiers.

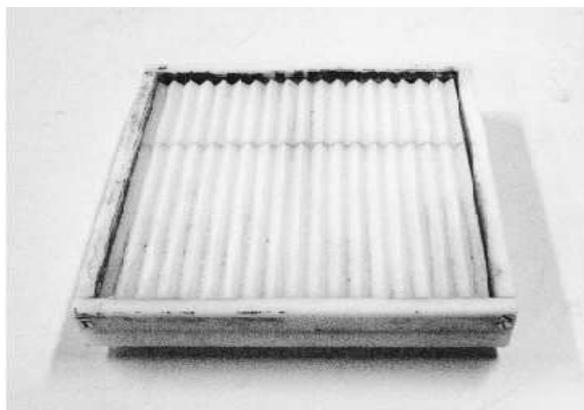


Figure 2.22 : Dispositif de fissuration pour mortier (Turcry, 2004).

L'essai se déroule dans une enceinte climatique à 20°C et 50% d'humidité relative, avec ou sans ventilateur à côté du moule (figure 2.22). Comme pour le béton, huit heures après la fabrication, on relève sur un calque le tracé des fissures. Pour chacune d'elles, on mesure la longueur et la largeur maximale avec une lentille graduée de précision $\pm 10 \mu\text{m}$. L'amplitude de la fissuration est la somme des aires des fissures, calculées comme le produit de la longueur et la largeur maximale (figure 2.23).

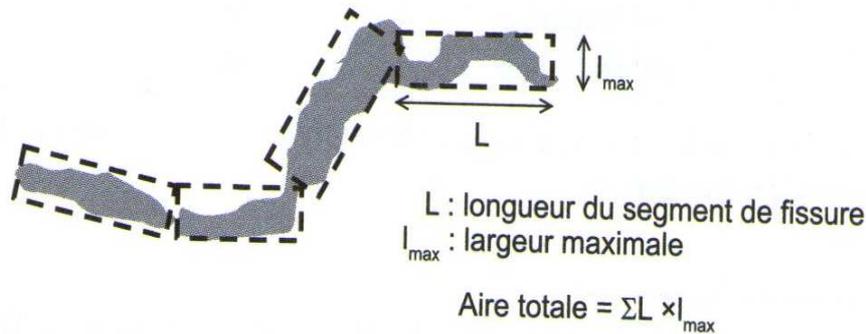


Figure 2.23 : Calcul de l'aire totale d'une fissure.

Les mesures permettent de déterminer la sensibilité à la fissuration à l'état frais. Le béton qui présente la plus grande largeur maximale de fissure sera le plus prédisposé à fissurer précocement.

Un nouvel anneau passif du retrait du béton a été développé dans le cadre de la thèse de Haouass (2007). Dans cet essai, un anneau rigide élastique en laiton, de diamètre intérieur 46 cm, d'épaisseur 2 cm, et de hauteur de 7 cm. La figure (2.24) montre une vue d'ensemble du système de mesure du retrait partiellement empêché avec l'anneau passif et la fissuration qui s'est produite dans un béton de formulation classique.

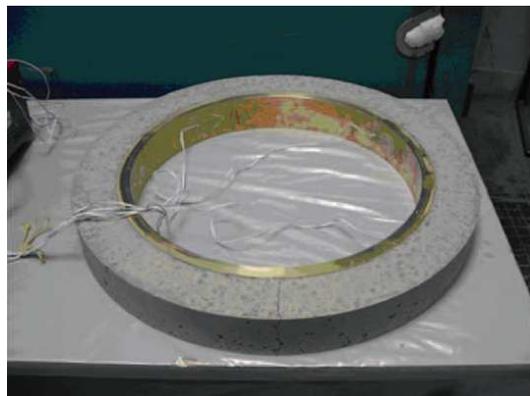


Figure 2.24 : Vue d'ensemble d'un essai de retrait à l'anneau.

VIII. MESURE DE L'EVAPORATION :

Pendant la mesure du retrait plastique avec séchage, on suit également l'évolution de la masse d'un échantillon cylindrique, de diamètre 10 cm et de hauteur 7 cm (figure 2.25). La perte de masse divisée par la surface du cylindre nous donne l'évaporation, exprimée en kg/m^2 . L'échantillon est soumis aux mêmes conditions extérieures que l'échantillon du retrait (on supposera donc que leurs taux d'évaporation sont identiques) (Turcry,2004).



Figure 2.25 : Mesure de l'évaporation.

IX. ESSAIS PHYSICO-MECANIQUE SUR DES MORTIERS DES BETONS AUTO-PLAÇANTS :

L'étude physico-mécanique des mortiers est subdivisée en deux parties ; Essais physiques et essais mécaniques.

- **Essais physiques** : Perte en poids, retrait (endogène et retrait total) et la pesée hydrostatique.
- **Essais mécaniques** : Résistance mécanique à la flexion et à la compression.

IX.1 Essais physiques :

IX.1.1 Perte en Poids :

Les mesures de la perte en poids (P en P) ont été effectuées en mesurant le poids des éprouvettes après démoulage et à chaque âge pour les deux cas : éprouvette couverte (retrait total) et non couverte (retrait endogène). Les résultats seront la différence entre la valeur du poids mesuré à l'instant t et celui du poids initiale de l'éprouvette.

Le calcul est effectué en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'éprouvette (Zreiki, 2009) :

$$\Delta m = 100 \times (m_{ini} - m_t) / m_{ini} \quad (2.9)$$

Avec :

Δm (%) : le pourcentage de perte en masse,

m_{ini} : la masse initiale de l'éprouvette avant dessiccation,

m_t : la masse mesurée à l'instant t.

Les mesures de perte en masse ont été effectuées sur des éprouvettes de chaque type de mortier.

IX.1.2 Pesée Hydrostatique :

Les mesures par pesée hydrostatique sont effectuées sur des éprouvettes ayant un âge de 28 jours, ainsi que d'autres mesures sur les mêmes éprouvettes à l'air libre.

Lorsqu'une meilleure précision est nécessaire pour évaluer la masse volumique du mortier, il est possible de procéder par pesée hydrostatique. Il s'agit de peser des éprouvettes de mortier dans l'air (m_1) puis dans l'eau (m_2). La différence $m_1 - m_2$ représente la masse du volume d'eau déplacé (v) ; si ρ_e est la masse volumique de l'eau, la masse volumique des éprouvettes est m_1/v (Dupain, 2000):

$$\rho = \rho_e (m_1 / (m_1 - m_2)) \quad (2.10)$$

IX.2. Essais mécaniques :

Tous les essais concernant les propriétés mécaniques des mortiers sont réalisés à l'aide d'une presse. Cette machine dispose de deux systèmes de chargement permettant de réaliser des essais de flexion et des essais de compression. La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure 2.26.

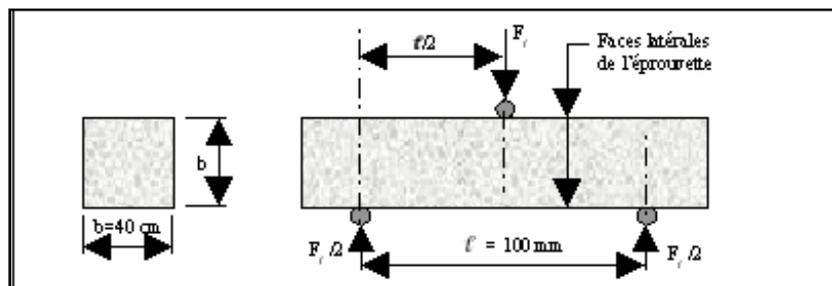


Figure 2.26: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

Si F_f est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut $F_f l/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = (1.5 \times F_f \times l) / b^3 \quad (2.11)$$

Cette contrainte est appelée la résistance à la flexion calculée compte tenu des dimensions de b , l et F_f qui est exprimée en newtons (N).

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la figure 2.27. Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = F_c / b^2 \quad (2.12)$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et F_c est exprimée en newton.

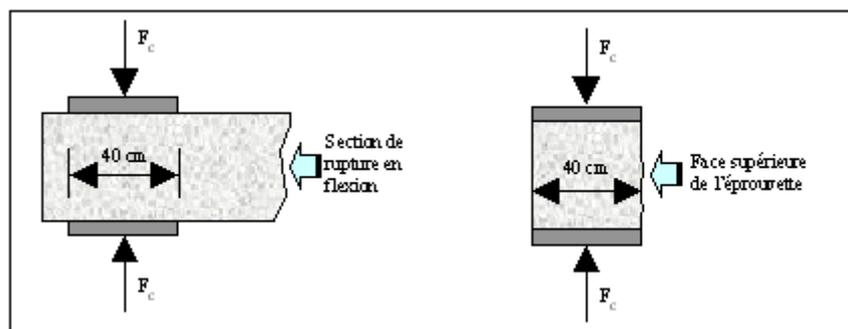


Figure 2.27: Dispositif de rupture en compression.

X. BILAN :

A l'état frais, le béton connaît une contraction de son volume, désignée de manière générale par retrait plastique, qui est susceptible de le faire fissurer. Il existe deux familles d'approches du mécanisme de fissuration. Dans la première, le problème est découpé en considérant d'un côté la sollicitation créant la fissuration, c'est-à-dire le retrait plastique, et de l'autre la résistance à la fissuration, c'est-à-dire la capacité de déformation du béton frais. Dans la seconde famille d'approches, que nous qualifierons de couplées, le problème est abordé de manière plus frontale par des études expérimentales de la fissuration.

XI .REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE II :

ACKER P., & BARRAL A., 1988 : « Déformation diffère du béton durci : étude critique des modèles analytiques de comportement », rapport de recherche, LCPC N°5.

ACKER P., 1992 : « Retraits et fissuration du béton ». Association française pour la construction, pages 10-40.

ACTER P., 1992 : « Retraits et fissuration du béton », document scientifique et technique. Association française pour la construction, pages 10-40.

AITCIN C., NEVILLE A., & ACKER P., (1998) : « Les différents types de retrait du béton ». Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées N° 215, Pages 41-51.

AITCIN P-C., 2001 : « Bétons haute performance », Edition Eyrolles, France.

ALRIFAI A., AGGOUN S., CABRILLAC R., 2008 : « Influence des Paramètres de Formulation sur le Retrait Endogène des Pâtes et des Mortiers », Issus de BAP, XXVIe Rencontres universitaires de Génie Civil, Nancy.

AMBROISE J., PÉRA J., 2002 : « Design of self-leveling concrete », *In Proceedings of the First North American Conference on the design and the use of self-compacting concrete*, Rosemont, Etats-Unis.

AOUAD A., 1998 : « Etude sur le retrait endogène de pâte de ciment ». Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, Canada.

BARCELO L., BOIVIN S., RIGAUD S., ACKER P., & CLAVAUD B., 1999 : “Linear volumetric autogenous shrinkage measurement : material behavior or experimental artifact”, *In Proceedings of Self-desiccation and its importance in concrete technology*, Lund.

BAROGHEL-BOUNY V., 1994 : « Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, Méthodes, Analyse, Interprétation ». Thèse de Doctorat, ENPC, pages 467.

BARON J., 1982 : « Les retraits de la pâte de ciment, le béton hydraulique : connaissance et pratique », Presses de l'école Nationale des Pont et Chaussées, Chapitre 27 « Les retraits de la pâte de ciment », Pages 485-501.

BENKECHKECH G., 2007 : « Etude du comportement des Bétons Autoplaçant influence des paramètres de composition et de chargement ». Thèse de Magister, Université de Montouri, Constantine.

BISSONNETTE B., & PIGEON M., 2000 : « Le comportement viscoélastique du béton en traction et la compatibilité déformationnelle des réparations » , Matériau et Constructions Volume 33, pages 108-118.

BOIVIN S., 1999 : « Retrait au jeune âge du béton : développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène ». Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.

BOUASKER M., 2007: “Etude numérique et expérimentale du retrait endogène au très jeunes âge des pates de ciment avec et sans inclusions”, Thèse de Doctorat, Université de Nantes.

BOUKNI., 2007 : « Tenu au feu des Bétons Autoplaçants », Thèse de magister, Université Mentouri , Constantine.

COQUILLAT G., 1987 : « Mesures fondamental sur éprouvettes définitions et méthode expérimentales », Annales de l'ITBTP, N° 455.

DUPAIN R., LANCHON R., & SAINT-ARROMAN J., 2000: « Granulats, Sols, Ciments et Bétons, caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire », Normes européennes. Edition Casteilla, Eleducalivre, France.

HAMMER T., 2002: “The relationship between settlement and plastic shrinkage of high strength concrete”. *In* Proceedings of the Full ACI Convention, Phenix USA. ACI.

HAOUSS A., 2007 : « Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires – caractérisation et modélisation chimio-hydro-mécanique du retrait ». Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan.

HUA C., ACKER P., & EHRLACHER A., 1996 : « Retrait d'autodessiccation du ciment analyse et modélisation macroscopique, Bulletin de liaison des Laboratoires des ponts et chaussées, N° 196, pages79 – 89.

KHATIB J.M., 2007:«Performance of self-compacting concrete containing fly ash», Construction and Building Materials 22, Pages 1963–1971

KOEHLER E.P., 2007:«Aggregates in Self-Consolidating Concrete». Thèse doctorat. Université de Texas, Austin.

KRONLÖF A., LEIVO M., & P. SIPARI P., 1995: “Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh concrete”. Cement & Concrete Research, 25(8), pages 1747-1754.

LE ROY R., 1996 : « Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances », Etudes et recherches des LPC OA 22, pages 343.

LOSER R., LEEMANN A., 2009:« Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete ». Materials & Structures

LOUKILI A., 2011 : Les bétons auto-plaçants *in* Mécanique et Ingénierie des Matériaux, édition Hermes Science Lavoisier, Paris, France.

MITANI H., 2003 : « Variations volumiques des matrices cimentaires aux très jeunes âges : approche expérimentale des aspects physiques et microstructuraux ».Thèse de Doctorat, L’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées,France.

MODJABI-SANGNIER F., 2010 : « Approche quantitative de la notion de compatibilité des bétons de répartition autoplaçant ».Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, Canada.

MOUNANGA P., 2003 : “Etude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermophysiques“, Thèse de doctorat, Université de Nantes, France.

NEVILLE M., DILGER W., & BROOKS J., 1983: “Creep of plain and structural concrete”. London Construction Press, pages 361.

NF EN 12617-4., 2002: « Produits et systèmes de protection et de répartition des structures en béton, Méthodes d’essai, partie4 : Détermination du retrait et du gonflement », Edition l’Association Française de Normalisation (AFNOR), France.

NF EN 1367-4., 2008 : « Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l’altérabilité des granulats, partie 4 : Détermination du retrait au séchage » », Edition l’Association Française de Normalisation (AFNOR), France.

PANE I., & HANSEN W., 2002: “Early age creep and stress relaxation of concrete containing blended cements”. *Matériaux et Constructions*, Volume n° 35, pages 92-96.

ROZIERE E., GRANGER S., TURCRY Ph., & LOUKILI A., 2007: “Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete”, *Cement & Concrete Composites* N°29, Pages 626–636.

SIAD H., 2010 : « Influence du type d’addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants », Thèse de doctorat, L’Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, France.

SMADI M., SLATE F O., & NILSON A., 1989: “Shrinkage and creep of high - medium - and low - strength concretes, including overlods”. *ACI Materials Journal*. Volume n°84, pages 224 -234.

SOROUSHIAN P., & RAVANBAKHS S., (1998):«Control of plastic shrinkage cracking with specialty cellulose fibers». *ACI Materials Journal*, 95(4), pages: 429-435..

TAZAWA A., 1998: “Proceeding of International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Japan Concrete Institute, Hiroshima.

TURCRY PH., & LOUKILI A.,2002: “Autogenous and thermal deformations of low water/cement ratio cement paste at early age”. *In Proceedings of the ASCE Engineering Mechanics Conference*, New-York, Etats-Unis.

TURCRY PH., 2004 : “ Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants – Influence de la Formulation”. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes.

UNO P.J., 1998: “Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas”. *ACI Materials Journal* 95(4), Pages 365-375.

WITTMANN F.H., 1976: “On the action of capillary pressure in fresh concrete». *Cement & Concrete Research* 6(1), Pages 49- 56.

ZREIKI J., 2009: « Comportement du béton au jeune âge dans les structures massives. Application au cas de réparation des ouvrages ». Thèse de Doctorat à l’Ecole Normale Supérieure de Cachan, France.

CHAPITRE 3

CARACTERISATION DES MATERIAUX

Toutes les études de formulation des bétons sont basées sur la connaissance des différentes caractéristiques de tous les composants du mélange en vue de lui offrir les meilleures performances.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 3:

I. CARACTERISATION DES GRANULATS :.....	64
II. CARACTERISATION DU CIMENT :.....	68
III. CARACTERISATION DES FILLERS CALCAIRES :.....	70
IV. CARACTERISATION DE LA POUZZOLANE :.....	70
V. CARACTERISATION DE L'ADJUVANT:	71
VI. EAU :.....	71
VII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 3 :.....	72

I. CARACTERISATION DES GRANULATS :

La carrière que nous avons choisie pour l'approvisionnement des granulats est celle de Sidi Abdelli qui appartient à l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG), elle se situe à 28 km au Nord-Est de la ville de Tlemcen sur la route nationale N°53 et à 4 km au sud de la localité de Sidi-Abdelli qui recèle des réserves importantes (figure 3.1). Les coordonnées Lambert sont : X = 149450 ; Y = 199500.



Figure 3.1 : Plan de situation du gisement de Djebel Abiod (Boukli, 2009).

Le gisement renferme des roches carbonatées appartenant au kimméridgien inférieur au jurassique supérieur. Elles sont d'origine organogène et chimique. Ce gisement est limité par des failles d'Est en Ouest et est coupé par une autre en deux gros blocs oriental et occidental dans les directions Nord-est et Sud-ouest.

La montagne d'Abiod est constituée de Karsts dont la répartition est irrégulière. Les roches les plus Karstifiées se rencontrent à proximité des zones de failles.

Les plus développées et constituant l'assise utile sont :

- les calcaires pelitomorphes gris clairs, massifs, compacts à fines passées de calcite.
- les calcaires dolomitiques et dolomies calcaires grises finement cristallines, massives et dures.
- les dolomies, moins répandues, grises foncées à petites cavités dues au lessivage.
- Le tableau (3.1) montre la composition chimique de la roche exploitée dans la carrière.

Tableau 3.1 : Composition chimique de la roche exploitée dans la carrière de Djebel Abiod (Hanini, 2012).

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P.F.
Min%	0.34	0.23	0.13	32.52	0.22	0.40	42.91
Max%	0.42	0.27	0.29	55.21	20.11	0.85	45.76
Moy%	0.38	0.25	0.23	44.38	9.88	0.66	44.30

Le choix retenu pour cette étude est dicté par le fait que c'est une grande carrière qui approvisionne principalement la région. Les réserves du gisement s'élèvent à 51125169 tonnes. Compte tenu des pertes d'exploitation (5 %) et des pertes de traitement (10 %), il est possible d'en fabriquer 43456394 tonnes d'agrégats. Donc, les réserves sont suffisantes pour assurer l'alimentation d'un concasseur ayant une capacité annuelle de production de 500 000 tonnes pendant 86,9 ans (Boukli, 2009).

I.1 Granularité :

Trois classes de granulats sont utilisées pour la composition d'un BAP : du sable « S 0/4 » et des gravillons « G 4/8, et G8/16».

Les échantillons ont été préparés suivant les prescriptions de la norme NA 453 et les analyses granulométriques faites conformément à la norme NA 2607. Les courbes granulométriques des gravillons sont présentées sur la figure 3.2.

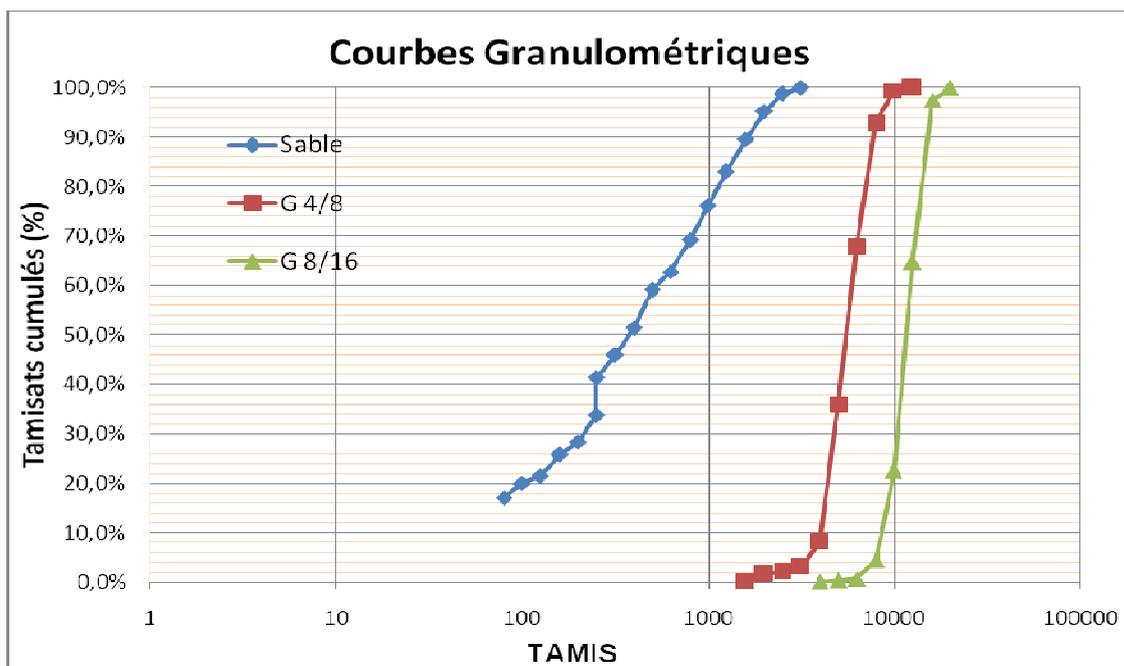


Figure 3.2 : Courbes granulométriques des granulats.

L'analyse granulométrique a montré que le sable est assez riche en éléments fins avec une teneur de 16% et un module de finesse de 2.30.

I.2 Masses volumiques:

Les masses volumiques apparentes et absolues des granulats sont déterminées conformément à la norme NA 255. Les granulats ont donné des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620. La masse volumique apparente est comprise entre 1300 kg/m³ et 1600 kg/m³ et la masse volumique absolue est comprise entre 2500 kg/m³ et 2700 kg/m³. Les résultats des masses volumiques obtenus pour les différents granulats sont récapitulés sur le tableau 3.2.

I.3 Propreté des granulats:

La propreté traduit l'absence d'éléments fins indésirables dans les granulats. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée. Les granulats utilisés doivent être propres car la présence des impuretés peut perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulats-pâte, ce qui provoque une incidence sur la résistance du béton.

I.3.1 Propreté des graviers :

Les graviers étudiés présentent une propreté satisfaisante (tableau 3.2) puisque, selon les spécifications exigées par la norme P 18-541, le pourcentage d'éléments inférieurs à 0.5 mm doit être inférieur à 3 % dans le cas des granulats concassés.

I.3.2 Essai d'équivalent de sable :

La détermination de la caractéristique « équivalent de sable » faite sur la fraction de granulat passant au tamis de 5 mm, permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans cette fraction en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile, impuretés...). L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du flocculat et de la partie sédimentée et ceci conformément à la norme NA 455. L'essai nous a donné un équivalent de sable de 70.07 % (tableau 3.2). La carrière de Djebel Abiod produit donc des sables qui répondent aux exigences de la norme P 18-541 qui fixe les limites à $ESV \geq 65$ et $ESP \geq 60$, pour les sables concassés ou broyés.

Dans notre cas, les essais d'équivalent de sable ont donné des résultats conformes à la norme suscitée, de ce fait, l'essai de bleu à la tache (VBS) n'est pas nécessaire (Baron et Ollivier, 1996).

I.4 Caractéristiques mécaniques:

I.4.1 Essai Micro-Deval :

L'essai permet de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai. Plus le coefficient est faible, plus la résistance à l'usure du gravier est élevée. L'essai ainsi que le calcul du coefficient Micro-Deval ont été effectués conformément à la norme NA 457. Les graviers présentent une bonne résistance à l'usure (tableau 3.2), sachant que, en fonction des usages, la norme XP P 18-545 exige des valeurs maxima tolérées inférieures à 35 %.

I.4.2 Essai Los Angeles :

La résistance à la fragmentation au choc est déterminée par le coefficient Los Angeles. L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets métalliques normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles pendant 15 minutes. L'essai ainsi que le calcul du coefficient Los Angeles ont été effectués conformément à la norme NA 458. La carrière Djebel Abiod produit des graviers qui répondent aux exigences de la norme P 18-541 qui exige des valeurs maximales tolérées inférieures à 40 %.

I.5 Coefficient d'absorption des granulats :

I.5.1 Graviers :

L'absorption de l'eau par les granulats « G4/8 et G8/16 » a été déterminée conformément à la norme NA 255. Les graviers étudiés ont des coefficients d'absorption qui répondent aux exigences de la norme P18-541 ($\leq 5\%$), les coefficients d'absorption des différents graviers sont récapitulés dans le tableau 3.2.

I.5.2 Sable :

L'absorption de l'eau par le sable a été déterminée selon la norme NF P18-555, tout en humidifiant le sable par une petite quantité d'eau par la suite on la sèche à l'aide d'un séchoir et après avoir terminé on met le sable dans un cône afin de déterminer son affaissement.



Figure 3.3 : La méthode utilisée pour la détermination du coefficient d'absorption du sable.

Tableau 3.2 : Récapitulatif des caractéristiques des matériaux.

Caractéristiques des granulats	Sable (0/4)	G4/8	G 8/16
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1477	1301	1313
Masse volumique absolue (kg/m^3)	2742	2576	2612
Equivalent de sable (%)	70.07	/	/
Coefficient d'absorption (%)	1.65	1.3	0.5
Essai de propreté (impuretés) (%)	/	0.84	0.67
Essai Los Angeles (%)	/	26	27
Essai Micro Deval (%)	/	5.64	10.4

II. CARACTERISATION DU CIMENT :

Le ciment utilisé est de type CPJ CEM II 42.5 (85 % de Clinker ; 3 % de Gypse ; 10 % de Pouzzolane et 2 % de Calcaire sableux) qui répond à la norme Algérienne NA 44, de la Société des Ciments de Béni-Saf appartenant à la wilaya de Ain-Temouchent. Ses propriétés chimiques et physiques sont résumées dans les tableaux 3.3 et 3.4 (Taleb, 2009) :

Tableau 3.3 : Propriétés chimiques du ciment (Taleb, 2009).

	Analyse chimique	Fluorescence X (%)
SiO ₂ (%)	27.97	25.64
Al ₂ O ₃ (%)	5.43	5.64
Fe ₂ O ₃ (%)	3.05	3.06
CaO (%)	56.37	58.01
MgO (%)	0.71	0.72
SO ₃ (%)	-	1.73
Na ₂ O (%)	0.30	0.71
K ₂ O (%)	0.43	0.51
CaO libre (%)	0.75	-
Résidus insolubles R.I.	9.11	-
Perte au feu	3.11	-
C ₃ S	59.98	-
C ₂ S	2.15	-
C ₃ A	9.87	-
C ₄ AF	9.31	-
C \bar{S}	2.94	-

Tableau 3.4 : Propriétés physico – mécaniques du ciment (Taleb, 2009).

Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3598
Masse volumique apparente (kg/m ³)	0.932
Masse volumique absolue (kg/m ³)	3.03
Consistance (%)	25.30
Expansion à chaud (mm)	1.00
Début de prise (mn)	217
Fin de prise (mn)	280
Refus sur un tamis de 100µm (%)	1.00
Résistance à la flexion	
02 jours (bars)	26.91
07 jours (bars)	63.18
28 jours (bars)	78.39
Résistance à la compression	
02 jours (bars)	123.15
07 jours (bars)	343.75
28 jours (bars)	453.12

Les masses volumiques (apparente et absolue) ont été déterminées conformément à la norme NF P 18-558. Nous avons pris la moyenne de 3 essais pour le calcul de la masse volumique absolue, en utilisant la méthode du pycnomètre. Les résultats de la masse volumique apparente et absolue sont récapitulés dans le tableau 3.4.

III. CARACTERISATION DES FILLERS CALCAIRES :

Les fillers calcaires proviennent de la carrière d'El Maleh situé à 12 Km d'Aïn Temouchent. La roche est de nature calcaire dolomitique.

Leur composition chimique est résumée dans le tableau 3.5:

Tableau 3.5 : Propriétés chimiques des fillers calcaires (Taleb, 2009).

Eléments	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	CO ₃	Anhydrite carbonatée	Eau de combinaison	Perte au feu
Min %	4.73	33.81	18.59	0.49	93.64	41.2	0.49	41.69
Max %	5.64	34.09	20.06	0.54	96.97	42.67	0.56	43.23
Moy %	5.18	33.95	19.32	0.51	95.30	41.93	0.52	42.46

Les fillers calcaires présentent une densité absolue est égale à 2.7, et une surface spécifique égale à 2900 cm²/g.

IV. CARACTERISATION DE LA POZZOLANE :

La pouzzolane provient d'un grand gisement volcanique située dans la région de Béni-Saf. Cette pouzzolane a été broyée et tamisée au laboratoire.

L'analyse chimique de la pouzzolane est résumée dans le tableau 3.6 :

Tableau 3.6 : L'analyse chimique de la pouzzolane (Taleb, 2009).

Eléments	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	CaCO ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Moy %	45.67	8.98	3.45	10.14	-	15.1	0.19	0.4	0.68

La densité de la pouzzolane est égale à 2.7, ainsi que la surface spécifique est égale à 2567 cm²/g

V. CARACTERISATION DE L'ADJUVANT:

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau avec effet retardateur spécialement formulé pour le béton prêt à l'emploi. Il est désigné sous l'appellation « TEK – superflow 2000 R ». Il est commercialisé par le groupe des sociétés Hasnaoui (Sidi Bel Abbes). Ses propriétés physiques se résument dans le tableau 3.7:

Tableau 3.7 : Caractéristiques du superplastifiant « TEK – superflow 2000 R ».

Aspect	Liquide
Couleur	Brune
Densité à 20° C	1.170 ± 0.03
pH à 20°C	9.5 ± 1
Teneur en Chlorures	≤ 1%
Extrait sec	35% ± 2%

IV. EAU :

L'eau utilisée est celui de la commune de Chetouane, ses caractéristiques chimiques sont résumées dans le tableau 3.8 (Boukli, 2009).

Tableau 3.8 : Caractéristiques chimiques de l'eau.

pH	Condct μS/cm	TA meq/l	TAC meq/l	TH meq/l	TCa mg/l	TMg mg/l	Cl ⁻ mg/l
7.87	80	00	9	405	48	357	141.8

SO ₃ mg/l	K ⁺ meq/l	Na ⁺ meq/l	Zn ²⁺ mg/l	Pb ²⁺ mg/l	M.O mg/l	P ₂ O ₅ mg/l
31	1.2	4	0.127	trace	0.4	0.06

V. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 3 :

BARON J., & OLLIVIER J.P., 1996 : « Les bétons bases et données pour leur formulation », Edition Eyrolles, Paris,France.

BOUKLI HACENE S.M.A, 2009 : « Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen », Thèse de Doctorat, Faculté de Technologie, Université de Tlemcen, Algérie.

HANINI W., 2012 : « Etude de l'incidence de la granularité sur la compacité des mélanges granulaires », Thèse de Magister, Faculté de Technologie, Université de Tlemcen, Algérie.

TALEB O., 2009 : « Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants a base de matériaux locaux », Thèse de Magister, Faculté de Technologie, Université de Tlemcen, Algérie.

CHAPITRE 4

E T U D E

EXPERIMENTALE

Ce chapitre est consacré à la formulation d'un BAP par la méthode Chinoise tout en impliquant la norme 206 -1. Nous avons dérivé à partir de la formulation de référence trois classes de mortiers (MBE, MT et MBAP) dont nous avons évalué la fluidité, les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement, viscosité) et les déformations instantanées (Retrait plastique, endogène, dessiccation et total).

Nous avons aussi jugé utile d'étudier dans cette partie l'influence du taux de substitution du ciment par des additions minérales (fillers calcaires et pouzzolane).

Le chapitre est clôturé par une étude comparative des résistances mécaniques développées pour l'ensemble des mortiers.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 4 :

I. FORMULATION DU BETON AUTOPLAÇANT :.....	74
II.FORMULATION DES MORTIERS :.....	79
III.ETUDE RHEOLOGIQUE :.....	83
VI.ETUDE DES DEFORMATIONS INSTANTANEEES :.....	86
V. RESULTATS ET INTERPRETATIONS :.....	90
VI.ETUDE DU RETRAIT PLASTIQUE :.....	98
VII. CORRELATION ENTRE LA PERTE DE MASSE ET LE RETRAIT :.....	102
VIII.ETUDE DES RESISTANCES MECANQUES :.....	103
IX. BILAN :.....	104
X.REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 4:.....	106

I. LA FORMULATION DU BETON AUTOPLAÇANT :

La méthode que nous proposons dans ce travail est basée sur la méthode chinoise et sur l'optimisation du squelette granulaire tout en intégrant la norme Européen (NF EN 206-1). Notre objectif est de proposer une méthode robuste qui s'appuie sur les caractéristiques physico-chimiques des constituants et sur le cahier des charges en termes notamment de classe de consistance et de classe d'exposition.

Le Béton Autoplaçant témoin doit satisfaire à des exigences d'exposition et de consistance (Norme 206-1 / 9).

I.1 Dosage En Liant « NF EN 206-1 » :

La norme NF EN 206-1 précise que le dosage minimal en ciment est de $C_{\min}=300 \text{ Kg/m}^3$, et afin de répondre aux exigences de toutes les classes d'exposition, nous avons choisi de prendre un dosage en liant équivalent $L_{\text{équi}}=380 \text{ Kg/m}^3$.

Afin de tester l'influence des additions minérales disponibles dans la région sur le phénomène du retrait, nous avons introduit les fillers calcaires et la pouzzolane dans la composition des mélanges.

La quantité du liant équivalent est calculée à partir de la formule (4.1):

$$\text{Liant}_{\text{équi}} = C + k \times A \quad (4.1)$$

Etant donné que le ciment utilisé est de type CEM II donc $k = 0$, cela implique que la teneur en liant équivalent est identique à celle du ciment.

$$k=0 \text{ (CEM II)} \Rightarrow \text{Liant}_{\text{équi}} = C = 380 \text{ Kg/m}^3 \quad (4.2)$$

Avec : k : coefficient de prise en compte des additions selon la norme NF EN 206-1

I.2 Dosage en eau :

Pour déterminer le dosage en eau, nous nous sommes basés sur la norme Européenne (NF EN 206-1) tel que:

$$\left(\frac{E_{\text{eff}}}{L_{\text{équi}}} \right)_{\text{Max}} = 0.5 \quad (4.3)$$

Avec ; $L_{\text{équi}} = C = 380 \text{ kg/m}^3$ et $E/C = 0.5$ ce qui donne $E = 190 \text{ l/m}^3$.

I.3 Essai au mini cône (NF EN 196-1) :

Afin de déterminer la fluidité d'un coulis, les essais du mini-cône ou du cône de Marsh restent les plus recommandés. Le mini cône est plus intéressant dans le sens où il nécessite une petite quantité de ciment (200 g) (Aitcin, 2001). L'étalement est la moyenne entre deux diamètres perpendiculaires.

$$D_{\text{moyen}} = (D_1 + D_2) / 2 \quad (4.4)$$

La démarche méthodologique de la méthode Chinoise prescrit d'avoir des pâtes de ciment pures et des pâtes de fillers pures qui ont la même fluidité (figure 4.1).

L'étude de la fluidité du coulis de ciment avec un rapport E/C=0.5, nous a permis d'obtenir un étalement de 11.5cm. Cette valeur d'étalement a été retrouvée pour un coulis de fillers calcaires avec un rapport E/F=0.42 comme indiqué sur la figure 4.2.

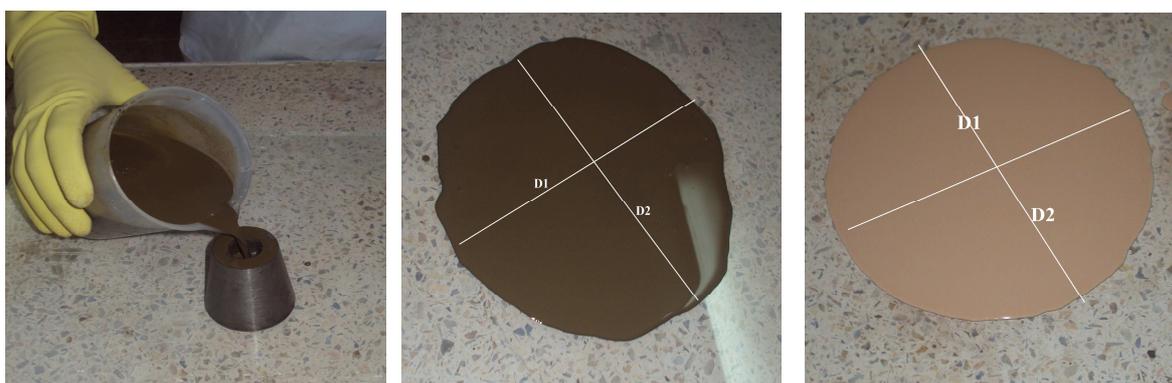


Figure 4.1 : Etalement au mini-cône de la pâte de ciment et des fillers calcaires.

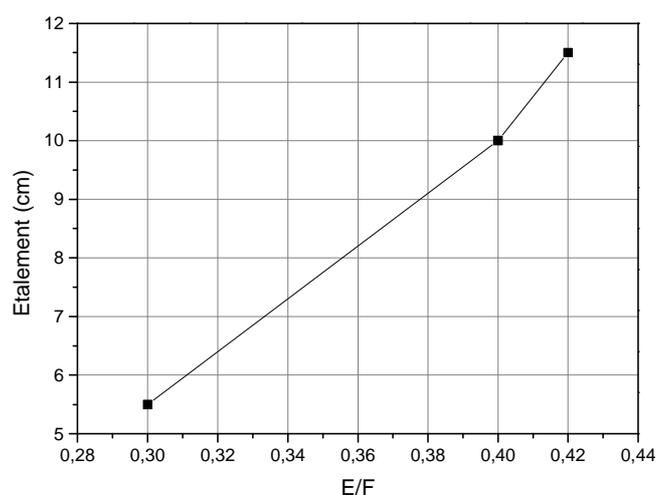


Figure 4.2 : Etalement du rapport E/F.

I.4. Détermination du dosage de saturation en superplastifiant :

La recherche du dosage en superplastifiant a été réalisée en effectuant des essais sur les pâtes en utilisant toujours le mini-cône. Les compositions des pâtes sont : (C= 200 g avec E/C=0.5) et (F=200 g avec E/F=0.42). Les résultats issus des essais effectués sur les pâtes, en faisant varier le dosage en superplastifiant, révèlent l'existence d'un dosage de saturation « $SP_{optimal}$ », dosage au dessus duquel l'étalement diminue.

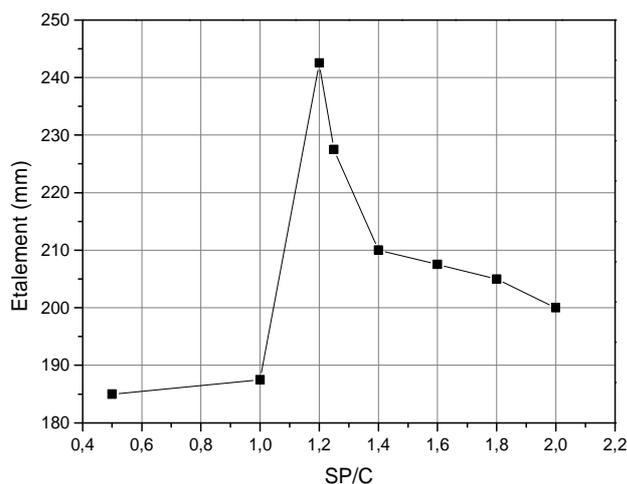


Figure 4.3 : Dosage de saturation en superplastifiant pour les coulis de ciment.

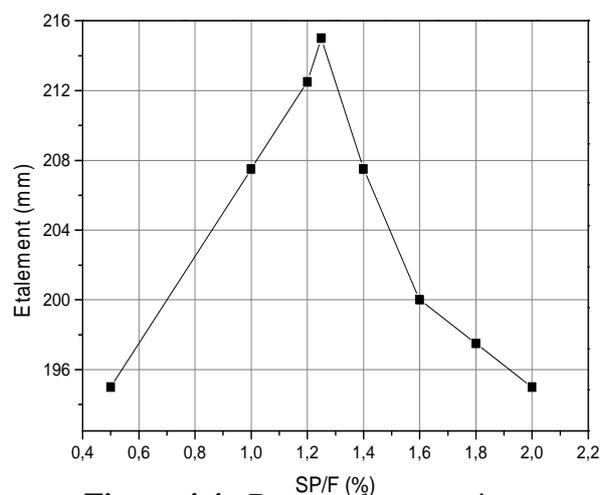


Figure 4.4 : Dosage de saturation en superplastifiant pour les coulis de fillers calcaires.

Les figures 4.4 et 4.3, montrent que l'étalement des pâtes de ciment ou des fillers au mini-cône diminue avec l'augmentation de la teneur en superplastifiant. La fluidité augmente rapidement dans l'intervalle de dosage en superplastifiant 0.5 – 1.2% pour SP/C de 0.5-et 1.25% pour SP/F. au-delà de ce seuil, la fluidité diminue. Ce seuil est désigné sous le nom de point de saturation au-delà duquel, il est inutile de rajouter du superplastifiant dans le coulis puisqu'on n'améliore en rien la fluidité de ce dernier. Un dosage en excès peut influencer le processus de l'hydratation et risque de retarder la prise du ciment, donc, indûment le durcissement du béton ou de créer un phénomène de ségrégation.

Nous constatons que le dosage de saturation en super plastifiant est de 1.2% du poids du ciment pour un coulis de ciment, et de 1.25% du poids des fillers pour un coulis de fillers calcaires.

I.5 Compacité des granulats :

Afin de sélectionner une combinaison de gros granulats, il faut déterminer les valeurs du facteur de compactage appelé aussi le Packing Factor « PF », qui représente le rapport entre la masse volumique apparente de l'empilement granulaire compacté par vibration et la

masse volumique du squelette à l'état empilé sans compactage et qui permet de calculer la compacité. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 4.1 :

Tableau 4.1 : Résultats des essais de compacité.

	Avec Compactage	Sans Compactage
S/G+S (%)	Mvapp (Kg/m ³)	Mvapp (Kg/m ³)
0	1696	1408
45	2247	1820
50	2240	1842
55	2247	1847
100	2072	1538

La figure 4.5 montre clairement que les valeurs optimales correspondent à S/G+S=50%, c'est à dire G/S=1.

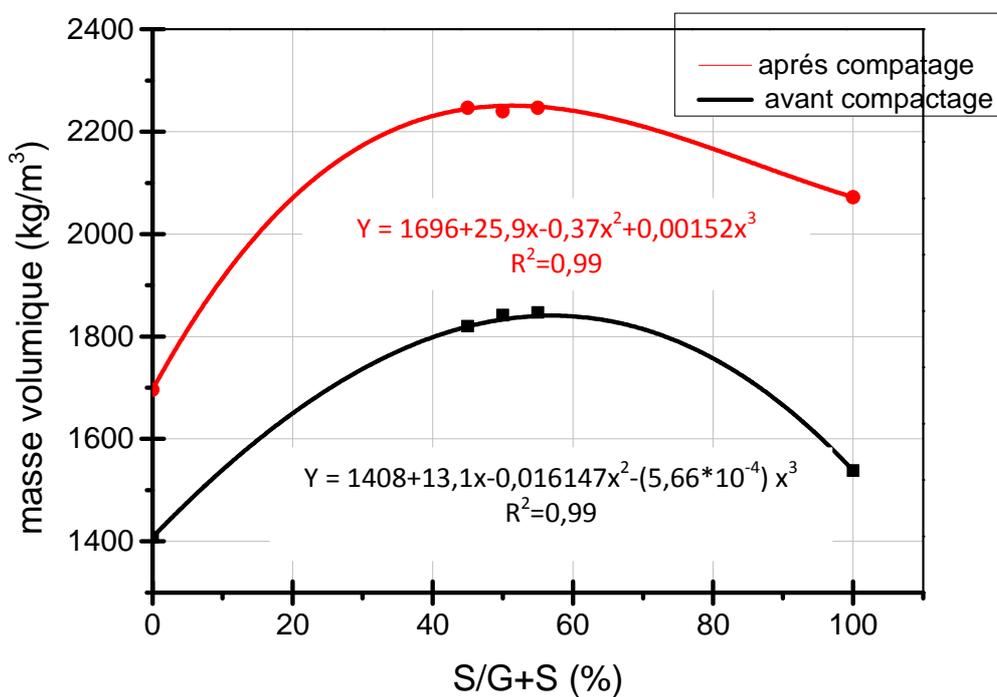


Figure 4.5 : Evolution de la masse volumique apparente avant et après compactage en fonction du rapport S/G+S.

I.6 Dosage en granulats :

A partir des résultats obtenus précédemment, une valeur moyenne de $PF=1.22$ a été adoptée dans ce travail. Ce résultat est conforme aux travaux de Su et col (2001), qui représente un intervalle du PF de 1.12 à 1.26, et qui montrent que cette valeur conduit à un BAP qui allie la rhéologie et la tenue mécanique adéquates.

Les calculs du dosage en gravillons et du dosage en sables sont comme suit :

$$\text{Le dosage en sable est tel que : } M_s = PF \times \rho_s \times \left(\frac{S}{G + S} \right) \quad (4.5)$$

$$\text{Le dosage en granulats est tel que : } M_g = PF \times \rho_g \times \left(1 - \frac{S}{G + S} \right) \quad (4.6)$$

$$\text{D'où : } M_s = 850 \text{ Kg} / \text{m}^3$$

$$M_g = 850 \text{ Kg} / \text{m}^3$$

La formulation du béton de référence est consignée dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2: Formulation du BAP de référence pour 1m^3 .

Matériaux utilisés	Les valeurs trouvées		
C (Kg/ m ³)	380		
F (Kg/ m ³)	29		
E (l/ m ³)	220		
Sp (l/ m ³)	5		
G (Kg/ m ³)	G (4/8)	33%	283
	G(8/16)	67%	565
S (Kg/ m ³)	848		
Étalement (mm)	710		
J-RING (mm)	640		
Stabilité au tamis (%)	1.65		
F _{c28} (MPa)	35.7		

II. FORMULATION DES MORTIERS :

Il est parfois intéressant d'étudier le comportement des bétons par le biais d'études sur des mortiers judicieusement choisis. Ces mortiers présentent l'avantage d'être plus faciles à tester ; les volumes des matériaux requis étant plus faibles du fait de la diminution du volume représentatif et de l'élimination des graviers.

Trois stratégies de calculs de mortiers associés à des bétons sont présentées dans cette partie. La première concerne l'obtention des Mortiers de Béton Equivalent (MBE), la seconde développe les Mortiers de Béton Autoplaçant (MBAP), et la dernière se focalise sur les Mortiers Thermiquement équivalents (MT).

II.1 Formulation des Mortiers de Bétons Equivalents (MBE):

Avec la méthode du mortier de béton équivalent, quatre formulations du MBE ont été confectionnées avec deux types additions (fillers calcaires et pouzzolanes), tout en faisant varier le rapport A/A+C. Les gravillons G4/8 et G8/16 de chaque mélange ont été remplacé par du sable lavé ayant la même surface développée. Le choix de remplacer les gravillons par le sable lavé a été fait afin d'éviter tout artefact du aux fines présentes dans le sable. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 4.3 et 4.4 :

Tableau 4.3 : Formulation des MBE à différents pourcentages en fillers calcaires pour 1m^3 .

F/F+C	0%	7%	15%	25%
Ciment (kg/m^3)	590	548	505	448
Fillers cal. (kg/m^3)	0	42	89	150
Sable (kg/m^3)	1224	1226	1225	1224
Sable lavé (kg/m^3)	92	92	92	92
Eau (kg/m^3)	312	309	307	304
Sp (l/m^3)	7	7	7	7

Tableau 4.4: Formulation des MBE à différents pourcentages en pouzzolane pour 1m^3 .

F/F+C	0%	7%	15%	25%
Ciment (kg/m^3)	590	548	505	448
Pouzzolane (kg/m^3)	0	42	89	150
Sable (kg/m^3)	1224	1226	1225	1224
Sable lavé (kg/m^3)	92	92	92	92
Eau (kg/m^3)	312	309	307	304
Sp (l/m^3)	7	7	7	7

Nous mentionnons que les formulations sont identiques car les fillers calcaires et pouzzolane ont la même densité (2.7) et nécessitent un même dosage de saturation.

II.2 Formulation des Mortiers de Bétons Autoplaçants (MBAP) :

Les compositions des Mortiers de Bétons Autoplaçants (MBAP), ont été établies sur la base des Bétons Autoplaçants, obtenus par la méthode Chinoise. Les MBAP sont calculés à base du béton de référence tout en retirant uniquement les graviers, les résultats des différents composants sont consignés dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Formulation des MBAP pour 1 m³.

F/F+C	0%	7%	15%	25%
Ciment (kg/m ³)	611	562	523	464
Fillers Cal. (kg/m ³)	0	43	92	155
Sable (kg/m ³)	1270	1260	1270	1270
Eau (kg/m ³)	322	325	316	313
Sp (l/m ³)	7	7	7	7
E/C+F	0,52	0,53	0,51	0,50

II.3 Formulation des Mortiers thermiquement équivalents (MT):

La formulation du Mortier thermiquement Equivalent consiste à garder les mêmes teneurs en ciment, eau et adjuvant et de remplacer le volume des granulats par un volume identique en sable lavé, les formulations des MT sont consignées dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Formulation des MT pour 1m³.

F/F+C	0%	7%	15%	25%
Ciment (kg/m ³)	413	380	354	314
Fillers Cal. (kg/m ³)	0	29	62	105
Sable (kg/m ³)	842	848	843	842
Sable lavé (kg/m ³)	842	848	843	842
Eau (kg/m ³)	235	226	226	224
Sp (l/m ³)	4,9	4,9	5	5

II.4 Comparaison massique entre le BAP et les mortiers associés :

La figure 4.6 permet de montrer la différence entre les compositions massiques des différents mélanges de notre étude.

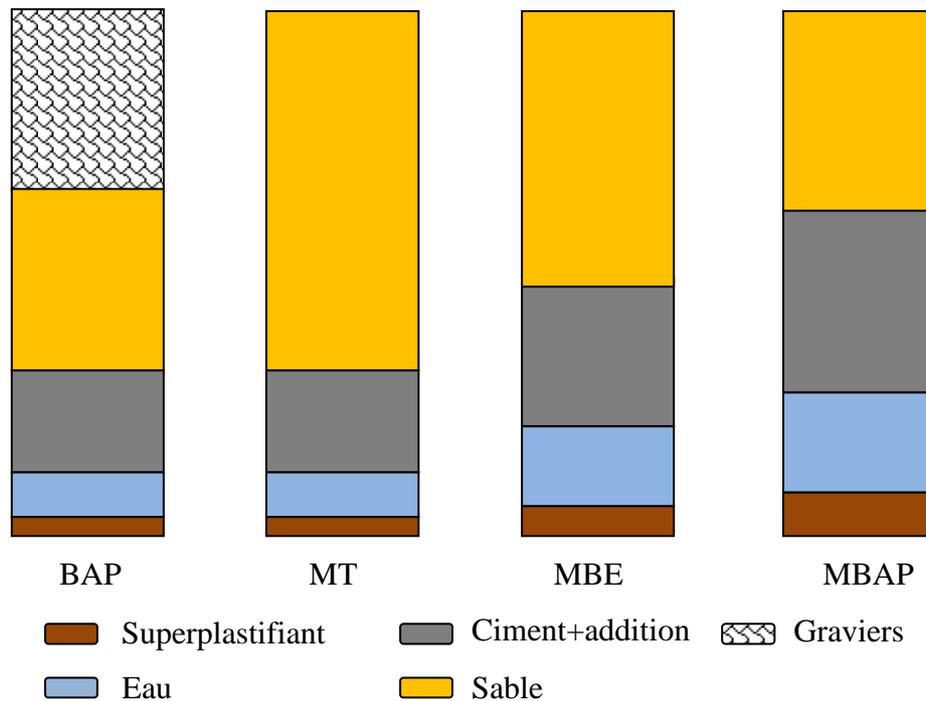


Figure 4.6 : Comparaison des constituants entre les différents mélanges.

II.5 Malaxage :

La procédure du malaxage et les mesures au mini-cône, sont volontairement détaillés, car elles dérogent quelque peu des pratiques habituelles (Schwartzentruber et col. 2000).

Le malaxage se fait avec un malaxeur à mortier conforme à la norme NF EN 196-1. La pâle du malaxeur doit être réglée à 4.5 mm du fond du bol. Les étapes du malaxage de ces différents mortiers sont les suivantes :

- Introduction de sable (lavé et non lavé) plus une quantité d'eau égale à son absorption augmentée de 1% ;
- Malaxage pendant deux minutes à petite vitesse ;
- Repos de 5 minutes tout en protégeant le récipient contre l'évaporation ;
- Introduction du ciment et des fillers, et malaxage pendant 30 secondes à petite vitesse ;
- Introduction de l'eau de gâchage et du superplastifiant, ce qui correspond à t_0 ;
- Malaxage pendant 30 secondes à petite vitesse puis 30 secondes à grande vitesse ;
- Raclage du fond et du pourtour du bol pendant 1min30s;
- Malaxage 1 minute à grande vitesse ;

II.6 Mesures au mini-cône :

Une fois le mortier introduit dans le mini-cône, la surface du cône est arasée. On procède au soulèvement du cône d'une manière lente et verticale. L'étalement est mesuré juste après sa stabilisation, selon deux diamètres orthogonaux à l'aide d'une règle métallique (figure 4.7), la valeur retenue est la moyenne des deux mesures.



Figure 4.7 : Etalement des MBE, MBAP et MT au cône.

II.7 Confection des Eprouvettes prismatiques :

Des épreuves 4x4x16 cm de mortiers, munies de plots, sont confectionnées pour les essais du retrait endogène et total ainsi que pour des essais mécaniques (flexion et compression).



Figure 4.8 : Moule 4x4x16 cm muni de plots.

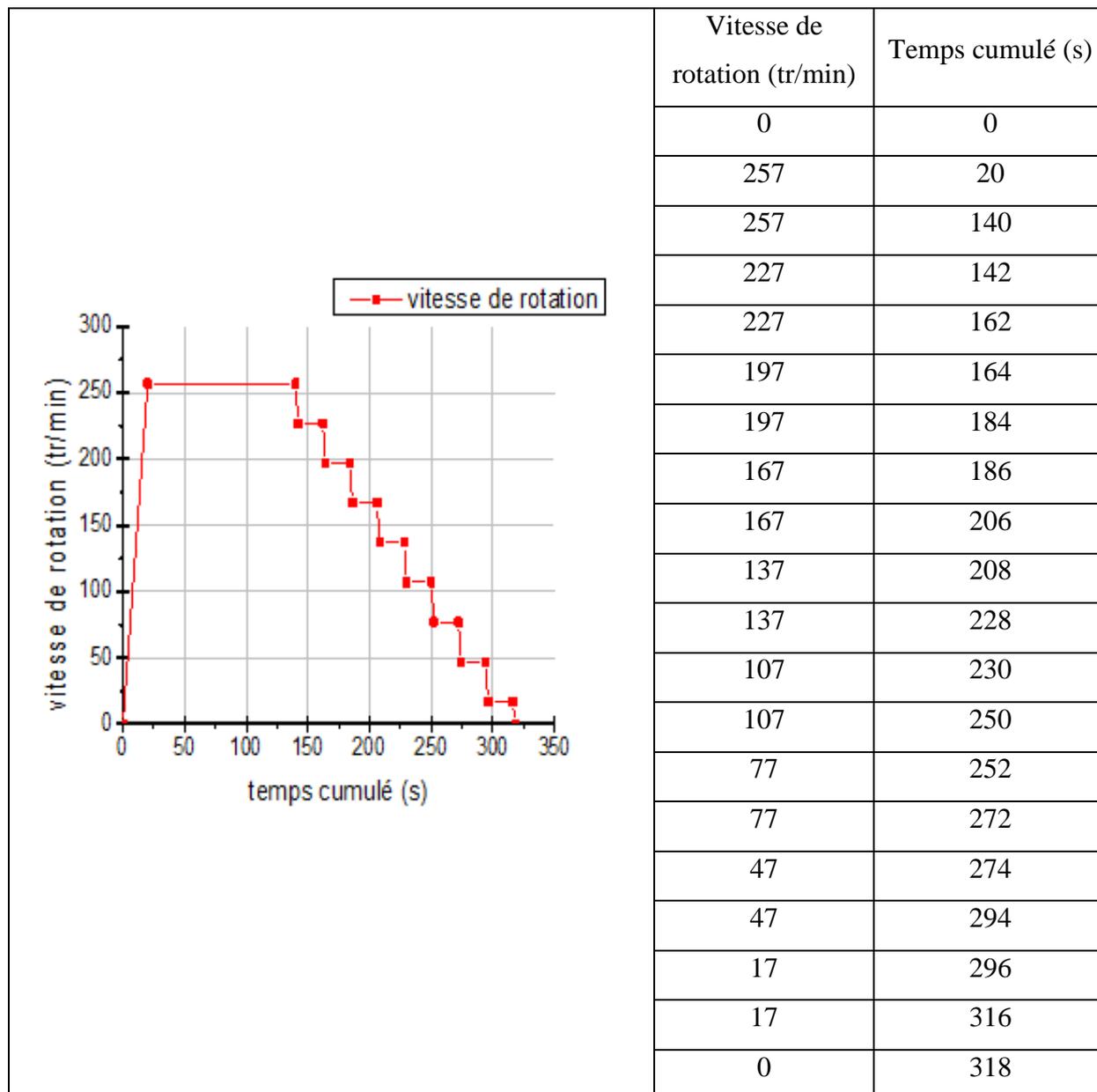
III. ETUDE RHEOLOGIQUE :

L'étude des paramètres rhéologique a été faite à l'aide d'un agitateur de type Heidolph (figure 4.9) pour déterminer les couples nécessaires à chaque vitesse de rotation.



Figure 4.9 : Essai rhéologique sur mortier.

Les bétons sont caractérisés en régime permanent d'écoulement. La vitesse de la partie mobile est augmentée rapidement pour s'affranchir des propriétés dépendantes du temps comme la thixotropie et pour tester le matériau dans un état suffisamment déstructuré. Ensuite le matériau est testé en effectuant des mesures à vitesse de rotation décroissante. Le profil de vitesse est mentionné sur le tableau 4.7.

Tableau 4.7 : Profil de vitesse imposé au cours d'un essai rhéologique pour le mortier.

La moyenne des dix dernières mesures de couple à chaque vitesse est représentative du régime permanent. Pour ces raisons, toutes les secondes le logiciel de pilotage de l'agitateur enregistre le couple de rotation (M) correspondant à la vitesse de rotation (Ω) imposée.

La figure 4.10 capturé par le logiciel « Watch and Control », montre l'allure des vitesses imposées (rouge) et des couples de rotation nécessaires (bleu) pour un des mortiers étudiés.



Figure 4.10: l'allure de la vitesse imposée (rouge) et des couples de rotation nécessaires (bleu) pour un des mortiers étudiés.

Les équations établies et validés par Lanos et col. (2009) sont utilisés pour l'exploitation des résultats et la détermination des paramètres rhéologiques recherchés. Les équations (4.7) et (4.8) expriment respectivement la vitesse de cisaillement lorsque le fluide est partiellement cisailé et complètement cisailé dans l'entrefer.

$$\dot{\gamma} = 2M \frac{d\Omega}{dM} \quad (4.7)$$

$$\dot{\gamma} = 2 \cdot \frac{M \frac{d\Omega}{dM}}{\left(1 - \frac{R_b^2}{R_c^2}\right)} - \frac{\Omega - M \cdot \frac{d\Omega}{dM}}{\ln\left(\frac{R_b}{R_c}\right)} \quad (4.8)$$

Le taux de cisaillement engendré par une vitesse de rotation Ω_i peut être déterminé par la formule (4.9)

$$\dot{\gamma} = \max(\dot{\gamma}_j ; \dot{\gamma}_j) \quad (4.9)$$

Avec :

$$\frac{d\Omega_j}{dM_j} \cong \frac{\Omega_{j+1} - \Omega_{j-1}}{M_{j+1} - M_{j-1}} ; \quad i = j \text{ et } j = 1 . n \quad (4.10)$$

Ainsi la contrainte correspondante à la vitesse de rotation Ω_i s'obtient selon les équations (4.11).

$$\tau_i = \frac{1}{2}(\tau_{j-1} + \tau_{j+1}) \quad (4.11)$$

Avec

$$\tau_j(M) = \frac{M_j}{2\pi h R_b^2} \quad (4.12)$$

R_b et h désignent le rayon et la hauteur du pôle et R_c le rayon du récipient.

VI. ETUDE DES DEFORMATIONS INSTANTANÉES :

VI.1 Retraits endogène et total :

En pratique, les échantillons testés au laboratoire pour évaluer les différents retraits du mortier durci sont conditionnés selon deux 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 (figure 4.11). 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 (figure 4.12).

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.

Afin de garder le même rayon de séchage, (défini par la formule 4.13 (Samouh et col, 2012)), qui a une influence directe sur le retrait de dessiccation nous avons choisi de travailler avec des éprouvettes pour mortiers 4×4×16 cm. Il est donc nécessaire de mentionner que les moules utilisés semblent avoir perdu leurs uniformités, ce qui pourra avoir une petite influence sur les résultats obtenus du retrait de dessiccation.

$$R_0 = 2V/S \quad (4.13)$$

V: Volume de l'éprouvette.

S : Surface de l'éprouvette exposée au séchage.



Figure 4.11 : Epreuve enveloppée



Figure 4.12 : Epreuve non enveloppée

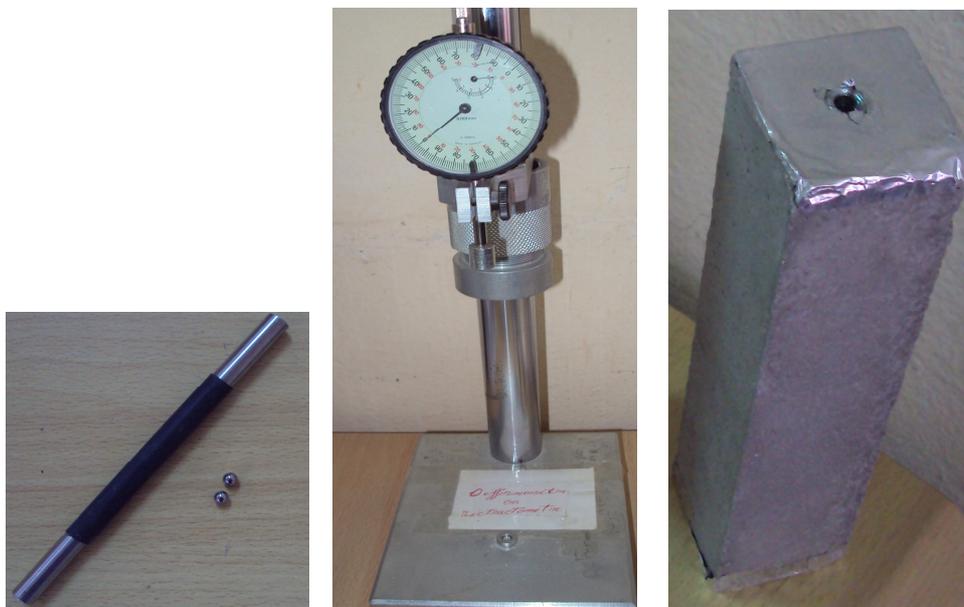


Figure 4.13 : L'ensemble des épreuves confectionnées de différentes formulations.

Pour les mesures linéiques, un rétractomètre équipé d'un comparateur de longueur adaptée à la taille des épreuves et d'une barre d'étalonnage, sont nécessaires pour effectuer nos essais (figure 4.14).

Avant chaque mesure, on procède toujours au nettoyage des orifices sur les deux extrémités de l'épreuve.

La mesure linéique de tous les mortiers (MBE, MT, MBAP) a été effectuée régulièrement afin d'évaluer le degré des retraits endogène et total.



a ; Etalon

b : Réfractomètre

c : Eprouvette avec plot

Figure 4.14 : Banc d'essai pour la mesure du retrait**VI.2 Perte de masse :**

Pendant la mesure du retrait endogène et total, nous avons suivi en parallèle l'évolution de la masse des échantillons.

VI.3 Retraits plastique et empêché :

Le dispositif pour la mesure du retrait plastique (figure 4.15) est inspiré de celui utilisé par Turcry (2004). Il est composé d'un moule carré $200 \times 200 \text{ mm}^2$ et d'une épaisseur de 15 mm, ondulé avec des barres FeE235 R.L, de diamètre 6 mm orientées dans le même sens. Les barres servent à orienter les fissures.

**Figure 4.15** : Vue en coupe du dispositif de fissuration des mortiers plein et vide.

L'étude du retrait plastique a été menée sur tous les types de mortiers (MBE, MBAP et MT) avec une substitution de 7% de ciment par des fillers calcaires. Dans notre étude, nous avons aussi intégré l'effet de la température. Pour cela nous avons choisi d'étudier l'influence de trois températures : 50°C, 40°C et 20°C.

VI.4 Evaporation :

Pendant la mesure du retrait plastique en fonction de la température exercée, nous avons suivi en parallèle l'évolution de la masse d'un échantillon cylindrique, de diamètre 10 cm et de hauteur 5 cm (figure 4.16). L'évaporation est déterminée par le rapport de la perte de masse sur la surface du cylindre.

L'échantillon est soumis aux mêmes conditions extérieures que l'échantillon du retrait plastique et on supposera dans ce cas que leurs taux d'évaporation sont identiques.



Figure 4.16 : Banc d'essai pour la mesure du taux d'évaporation

VI.5 Résistance à la compression et à la flexion :

Les résistances à la compression et à la flexion du mortier durci ont été évaluées à 28 jours en utilisant une machine permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10 KN, pourvue d'un dispositif de flexion à 3 points (figure 4.18). Les résistances en compression ont été évaluées à 28 jours en utilisant une machine d'essai en compression hydraulique permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN, pourvue d'un dispositif de compression pour les moules de mortiers (figure 4.17). La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.



Figure 4.17 : Dispositif de compression



Figure 4.18 : Dispositif de flexion

V. RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

V.1 Etude rhéologique sur les différents types de mortiers :

Les essais d'étalement ont montré que l'augmentation du dosage en liant (MBAP et MBE) a amélioré la maniabilité du mélange. La figure 4.19, montre que tous les mortiers (MBAP et MBE) présentent des caractéristiques autoplaçantes, puisque les étalements de tous les mélanges sont supérieurs à 26 cm.

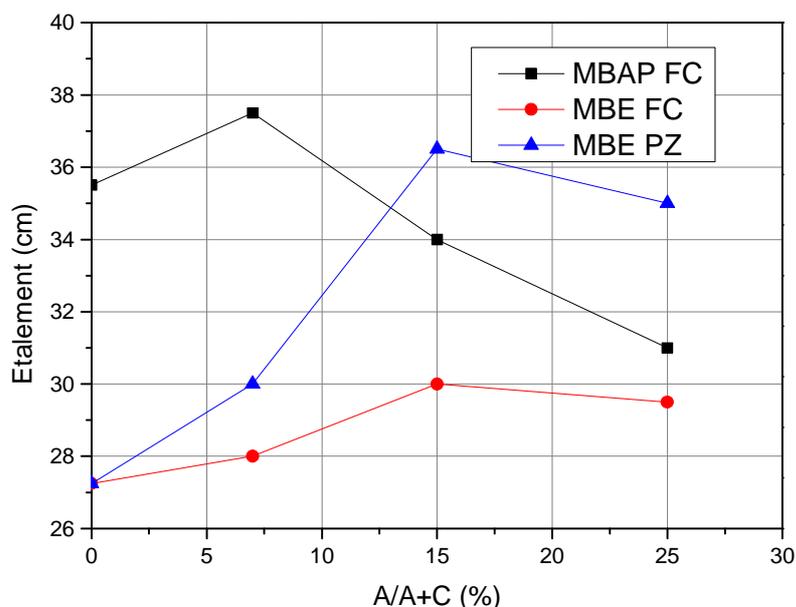


Figure 4.19 : Etalement en fonction du rapport A/A+C.

Le mortier MT, qui est presque considéré comme un béton de sable, s'est affaissé au lieu de s'étaler (figure 4.20 et 4.21).

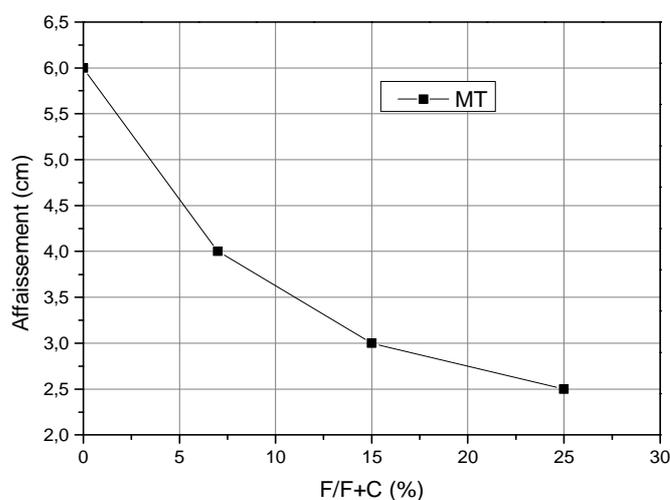


Figure 4.20 : Affaissement en fonction du rapport F/F+C.



Figure 4.21 : Affaissement au mini cône.

Nous constatons aussi que la pouzzolane donne un meilleur effet sur la fluidité du mélange par rapport aux fillers calcaires. Par ailleurs, en comparant la fluidité des MBE et des MBAP à base de fillers calcaires, nous constatons que les MBAP présentent les meilleurs étalements. Ce constat est sûrement dû à la présence d'une plus grande quantité d'eau libre dans le mélange, vu que les dosages en superplastifiant et en eau sont plus importants dans ce mortier (MBAP).

Les essais rhéologiques sont très bénéfiques pour apprécier l'influence réelle des additions sur les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et la viscosité). Les résultats des essais au rhéomètre sont présentés sur les figures 4.22 et 4.23.

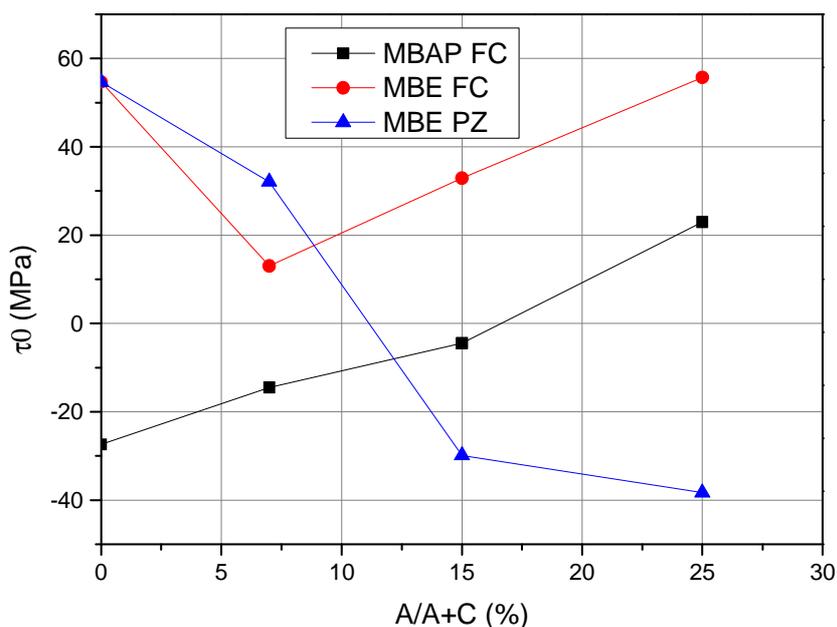


Figure 4.22 : le seuil de cisaillement en fonction du rapport A/A+C.

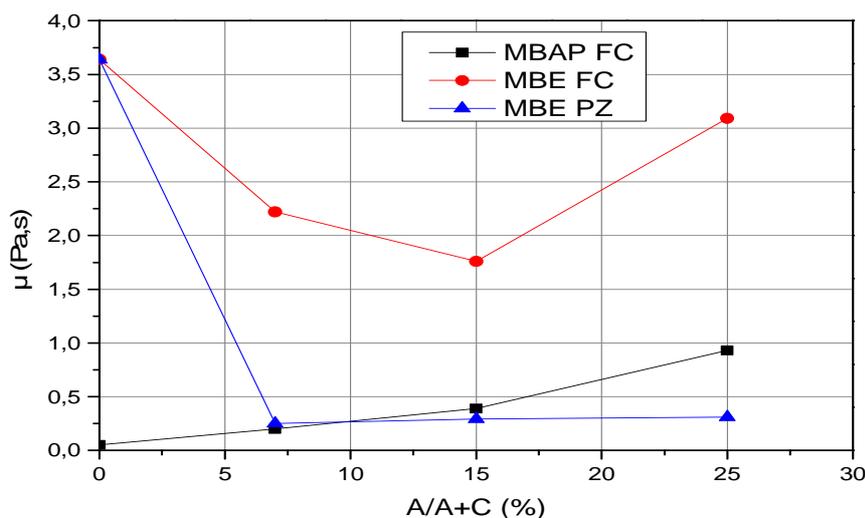


Figure 4.23 : la viscosité en fonction du rapport A/A+C.

Pour les Mortiers de Bétons Autoplaçants (MBAP), nous remarquons que l'augmentation du rapport F/F+C augmente les frictions au niveau de la pâte, ce qui a tendance à augmenter la viscosité et le seuil de cisaillement du mortier.

Pour les MBE, un optimum de 15%, de substitution de ciment par des fillers calcaires, a été identifié. Au delà de ce seuil, la viscosité et le seuil de cisaillement augmente rapidement.

Par ailleurs, la croissance du taux de pouzzolane a toujours permis de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité de mortier. Néanmoins, aucune corrélation n'a été faite entre l'étalement et les paramètres rhéologiques dans ce cas.

V.2 Retrait des Mortiers de Bétons Equivalents :

V.2.1 Cas des fillers calcaires :

Nous avons dans un premier temps étudié l'influence de la teneur en filler sur le retrait endogène, total et de dessiccation. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 4.24 et 4.25.

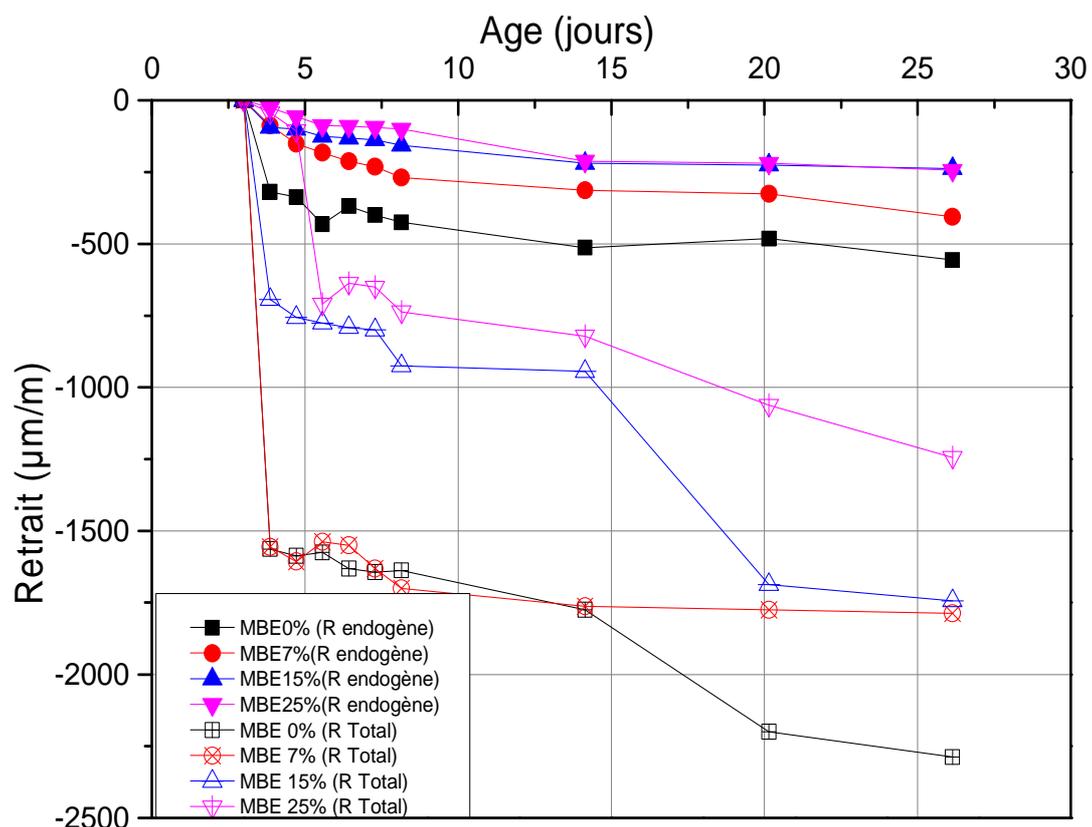


Figure 4.24 : Le retrait endogène et total des MBE.

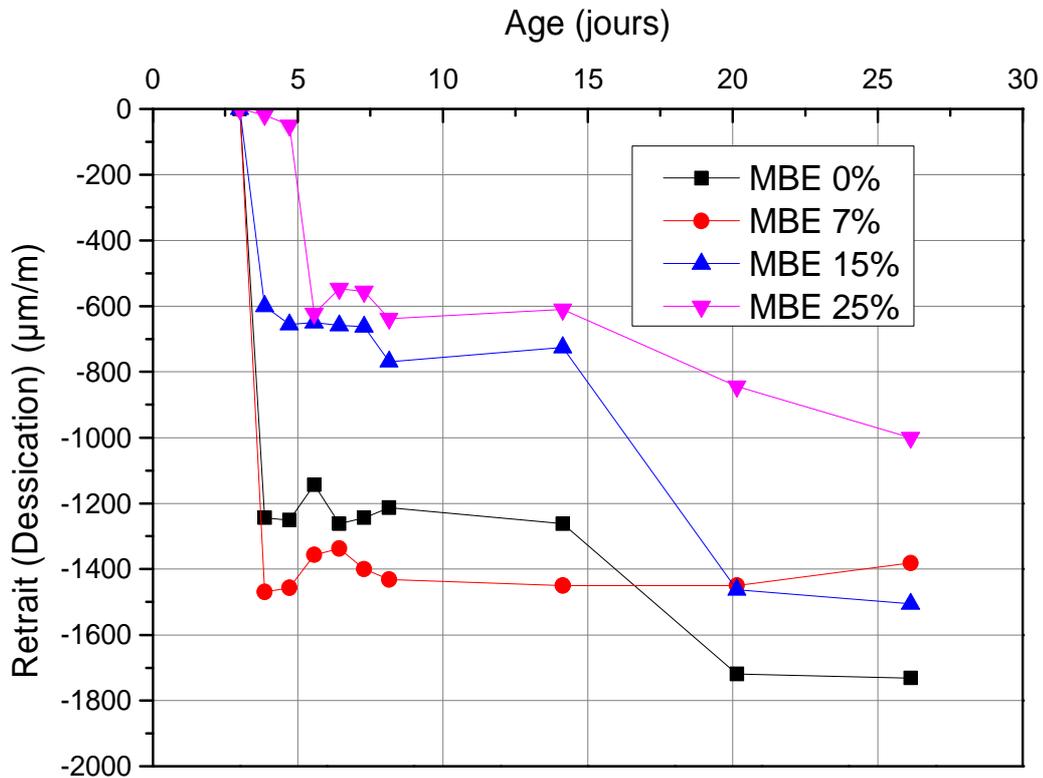


Figure 4.25: Retrait dessiccation des MBE.

Le retrait de dessiccation est dû à la perte d'une partie de l'eau de gâchage dans le cas où le mortier est conservé dans une atmosphère à humidité relative plus faible que celle de la matrice cimentaire. La cause principale du retrait de séchage est l'assèchement progressif de la pâte de ciment. Le retrait de dessiccation est calculé par la différence entre le retrait total et le retrait endogène, il est présenté en fonction du temps et de la perte de masse.

A partir des figures 4.24 et 4.25, nous constatons que le phénomène du retrait est toujours en évolution pendant la période d'étude. Il apparaît clairement que le comportement est accentué pendant les cinq premiers jours d'où la nécessité d'utiliser des moyens de cure comme l'arrosage pendant cette période.

La figure 4.24 montre que le retrait endogène est plus prononcé pour les MBE à faible teneur en addition. Ce résultat est logique et en adéquation avec les résultats d'Alrifai (2008).

Le retrait endogène est un phénomène propre à l'hydratation du ciment et à la quantité des hydrates formés. Il peut être sujet à un retrait thermique dû au dégagement de chaleur lors des réactions d'hydratation.

Les résultats sur le retrait total semblent être identiques à ceux du retrait endogène. Cependant le retrait total est plus important car il est dû à l'implication du retrait endogène et du retrait de dessiccation. A titre d'exemple pour un MBE (0% d'addition), le retrait à 5 jours passe de 368.75 $\mu\text{m/m}$ pour un retrait endogène à 1631.25 $\mu\text{m/m}$ pour un retrait total, et de

556.25 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 2287.5 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 28 jours, ce qui conduit à un retrait total quatre fois supérieur au retrait endogène.

Les tendances s'emblent s'atténuer légèrement après la première semaine. L'évolution du retrait de dessiccation est déterminé sur la base du retrait total et endogène ($\epsilon_{\text{dess}} = \epsilon_{\text{total}} - \epsilon_{\text{endo}}$).

Nous remarquons aussi que la cinétique d'hydratation du retrait de dessiccation (exogène) est presque identique pour l'ensemble des MBE à base de fillers calcaires. Néanmoins, les différences relatives du retrait ne sont plus constantes dans le temps. Ce comportement peut être du à une différence du rayon de séchage.

V.2.2 Cas de la pouzzolane :

Nous avons entre autre étudié l'influence de la pouzzolane sur le retrait endogène, total et de dessiccation. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 4.26 et 4.27.

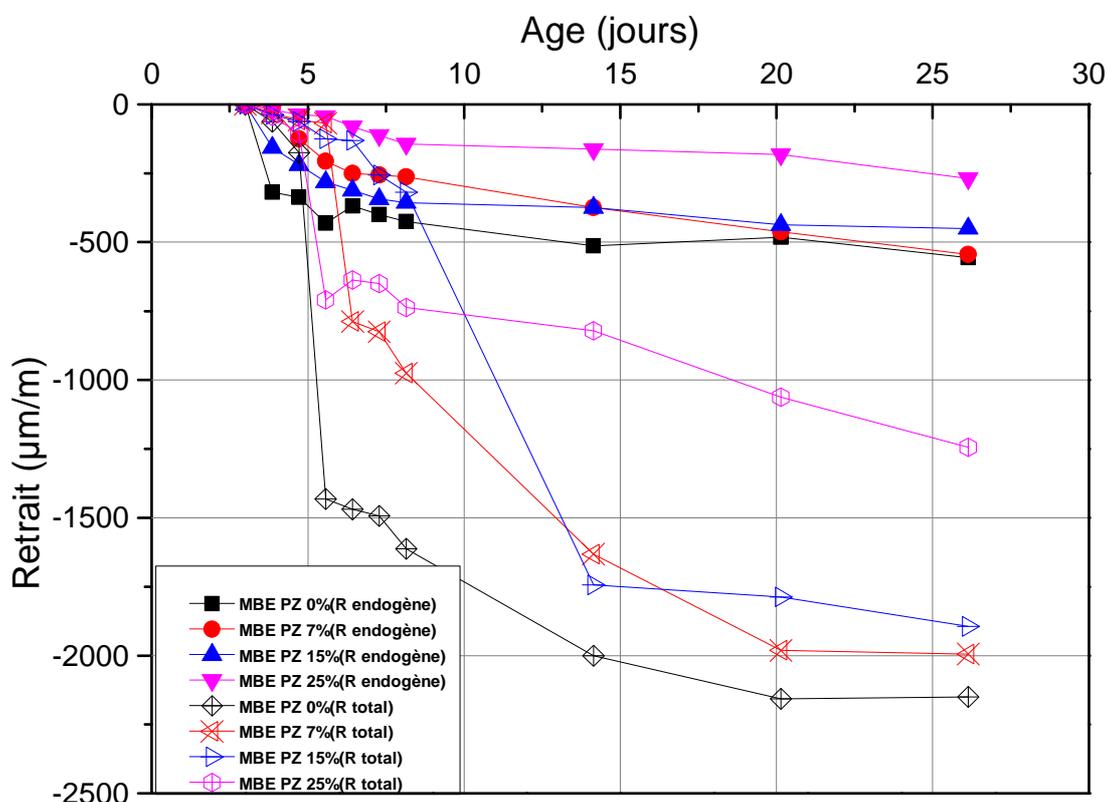


Figure 4.26 : Retrait total et endogène des MBE à base de la pouzzolane.

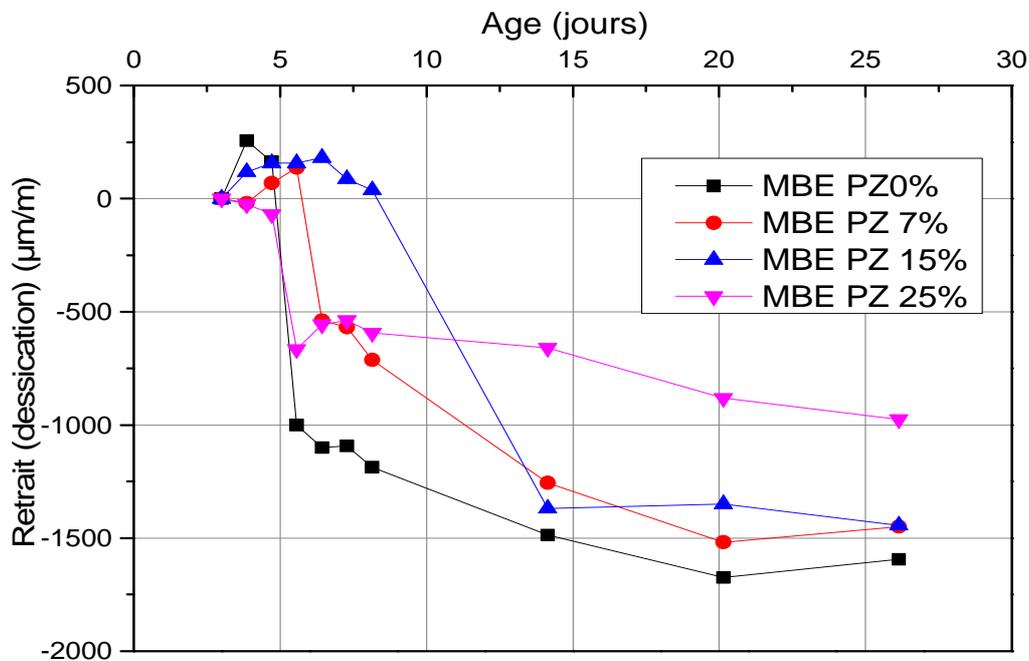


Figure 4.27 : Retrait de dessiccation des MBE.

La cinétique du retrait des MBE à base de la pouzzolane est identique à celle des MBE formulé avec les fillers calcaires. L'incorporation de la pouzzolane a permis de réduire significativement les déformations instantanées. Une substitution de 25% de pouzzolane a réduit de moitié le retrait endogène à 28 jours par rapport à un mortier sans pouzzolane, ce même taux de substitution a permis de décroître le retrait total de 72%.

Cependant, en comparant le retrait des MBE à base des deux types d'additions, nous avons constaté l'apport bénéfique des fillers calcaires est plus particulièrement sur le retrait endogène.

V.3 Retrait des Mortiers des Bétons Autoplaçants :

L'interprétation des courbes de retrait n'est pas toujours une chose facile car plusieurs facteurs ainsi que l'interaction entre eux peuvent avoir une influence sur le phénomène.

Comme nous l'avons précisé précédemment, les Mortiers des Bétons Autoplaçants (MBAP) (figure 4.28) présentent la plus grande fluidité par rapport aux autres types de mortiers étudiés (MBE et MT) à cause d'une défloculation des grains de ciment qui est à l'origine d'une plus grande quantité d'eau libre dans le mélange. Dans ce cas, la quantité d'eau devient plus importante pour créer un retrait endogène rapide car les pores restent saturés, ce qui explique que le retrait endogène des MBAP est moins important que celui des MBE et qui est lui-même inférieur que celui des MT.

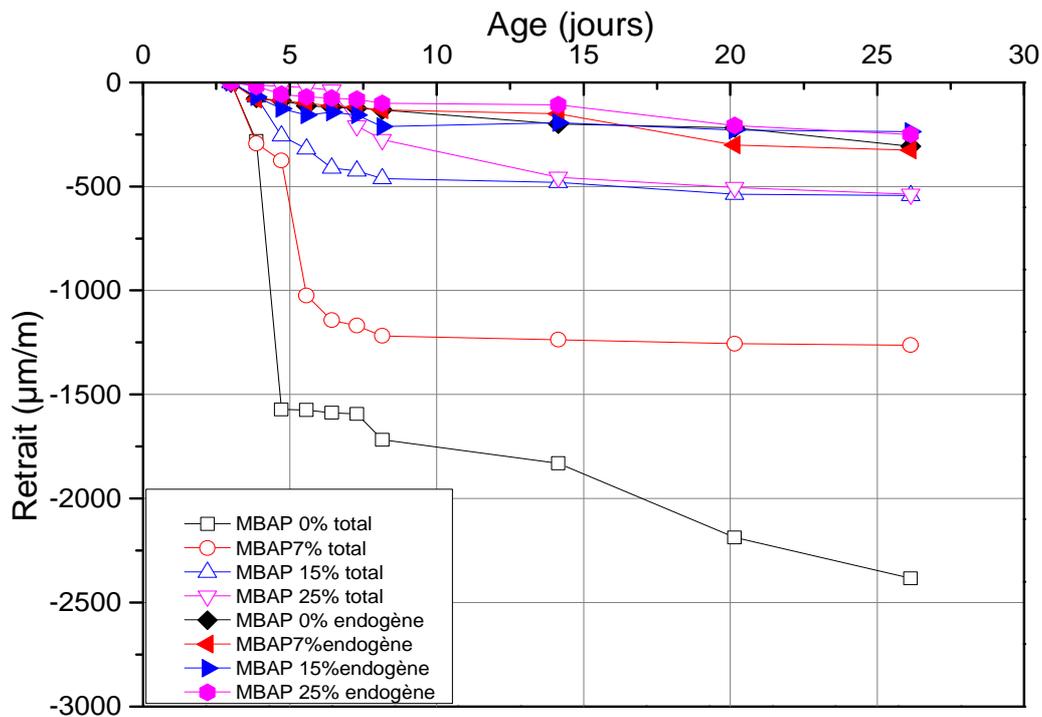


Figure 4.28 : Retrait total et endogène des MBAP.

Nous constatons aussi, dans ce cas, que l'effet du rapport $E/C+F$ devient plus important que l'effet du taux de substitution. Ainsi, le mortier (MBAP) avec le plus grand rapport $E/C+F$ (MBAP 7% avec $E/C+F = 0,53$) subit moins de contraction que le MBAP (0% avec $E/C+F = 0,52$) et ainsi de suite.

Pour le retrait total, la cinétique semble être différente puisque le taux de substitution reste le paramètre prédominant.

V.4 Retrait des Mortiers Thermiquement Equivalents :

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le mortier pour faire réagir les différents réactifs. Le retrait endogène sera d'autant plus fort si le rapport E/C est plus faible. La présence d'une quantité supplémentaire de sable dans le mortier (MT) a tendance à absorber une quantité d'eau, entraînant une diminution du rapport E/C . Ceci induit une structure plus dense de la pâte de ciment contenant des pores plus fines, les forces capillaires sont donc plus fortes générant un retrait endogène plus élevé que celui des MBE.

La même figure 4.29 montre que la cinétique du retrait est accentuée au cours de la première semaine. Nous pensons, qu'au-delà de cette période l'eau emmagasinée dans le sable est rediffusé dans la pâte de ciment. Cette eau a un effet direct sur la dépression capillaire qui diminue, car elle remplit les vides créés par la contraction Le Chatelier, ce phénomène est

appelé la cure interne comme définit selon les travaux de Lura et Durand (2006), (cité dans Bouasker, 2007), qui permet d'atténuer la cinétique du retrait endogène. Par ailleurs, le retrait total des MT semble être moins important que celui des MBE à cause de l'augmentation de la fraction volumique du sable qui est moins déformable que celle de la pâte.

Les mortiers MT possèdent le même volume de granulats que les bétons associés. Les MBE possèdent, quant à eux, un volume moindre de granulats que les bétons. Il y a donc moins de sable dans les MBE que dans les mortiers MT, alors que les quantités de ciment et d'eau sont conservées. La capacité calorifique des MBE est donc plus faible (en négligeant le rôle de l'air) que celle des mortiers MT : ils atteindront donc des températures plus élevées et les réactions chimiques de leur prise seront ainsi plus thermoactivées. On peut penser que les distances intergranulaires seront plus grandes pour les mortiers MT que pour les MBE. Les MBE devraient donc avoir une prise beaucoup plus rapide que celle des mortiers MT associés.

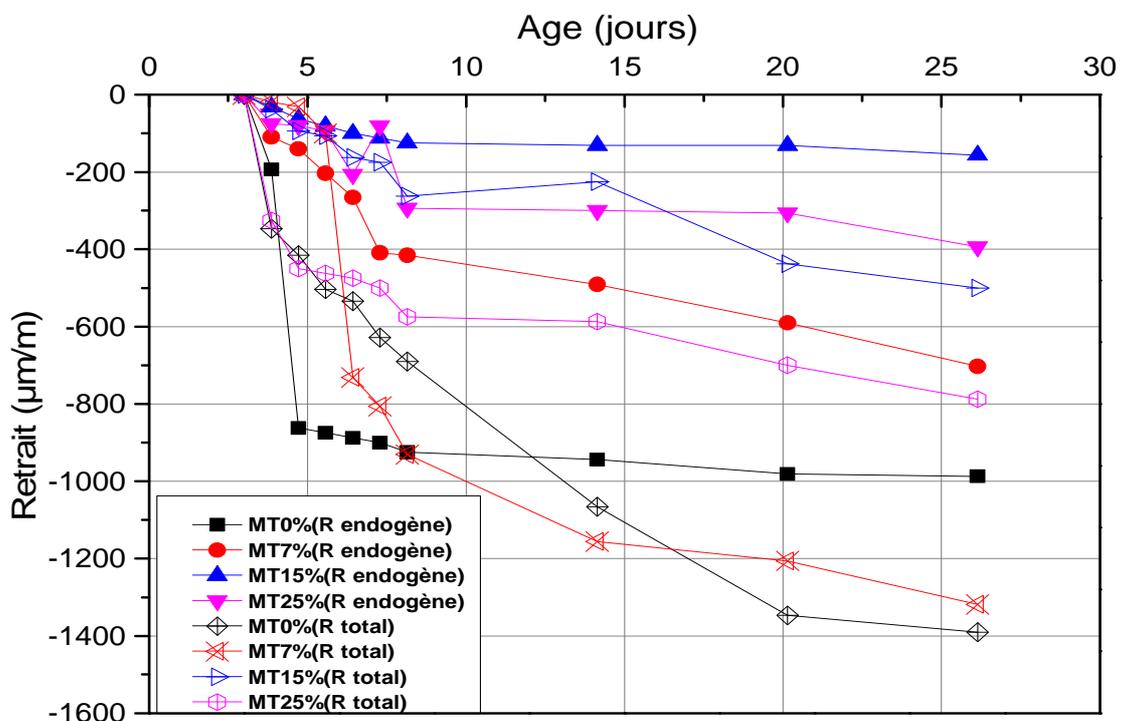


Figure 4.29 : Retrait total et endogène des mortiers MT.

VI. ETUDE DU RETRAIT PLASTIQUE :

Le retrait plastique est défini comme la contraction du béton en phase plastique consécutive au séchage. Il se développe lorsque la quantité d'eau évaporée à la surface est supérieure à la quantité d'eau de ressuage. Lorsque le retrait ne peut pas se faire librement dans une structure, le béton est mis en traction et risque, par conséquent, de se fissurer.

A partir des figures 4.30, 4.31 et 4.32, nous constatons que l'amplitude de la fissuration a clairement augmenté dans des conditions climatiques plus sévères (Température 40°C et 50°C). Un climat chaud se confirme être un facteur aggravant le retrait plastique. Ceci est principalement dû au taux d'évaporation en fonction de la température exercée comme le montre la figure 4.33. Ainsi lorsque le taux d'évaporation est plus important, les déformations le sont aussi.

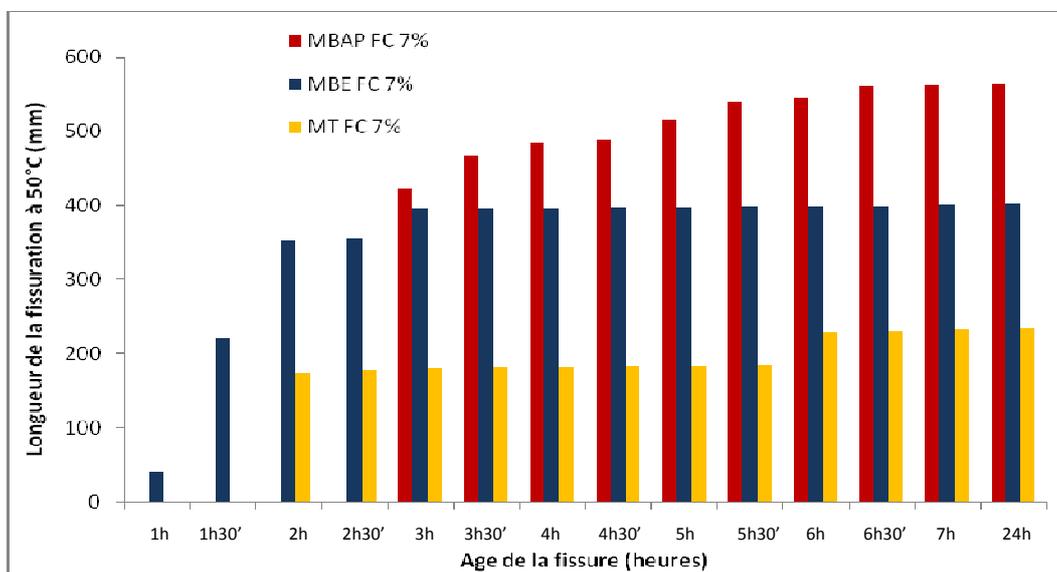


Figure 4.30 : La longueur de la fissuration à 50°C des différents mortiers.

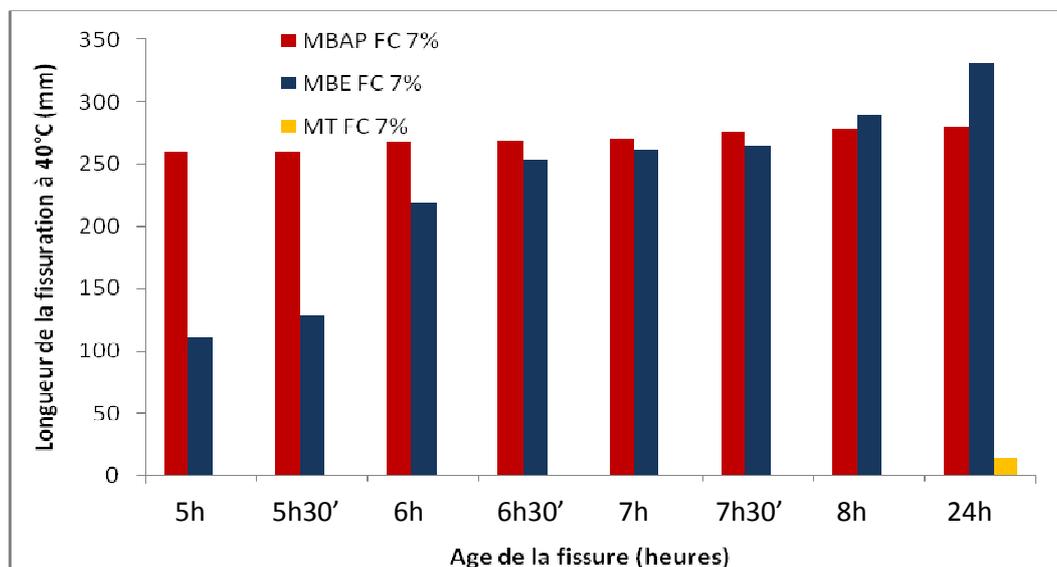


Figure 4.31 : La longueur de la fissuration à 40°C des différents mortiers.

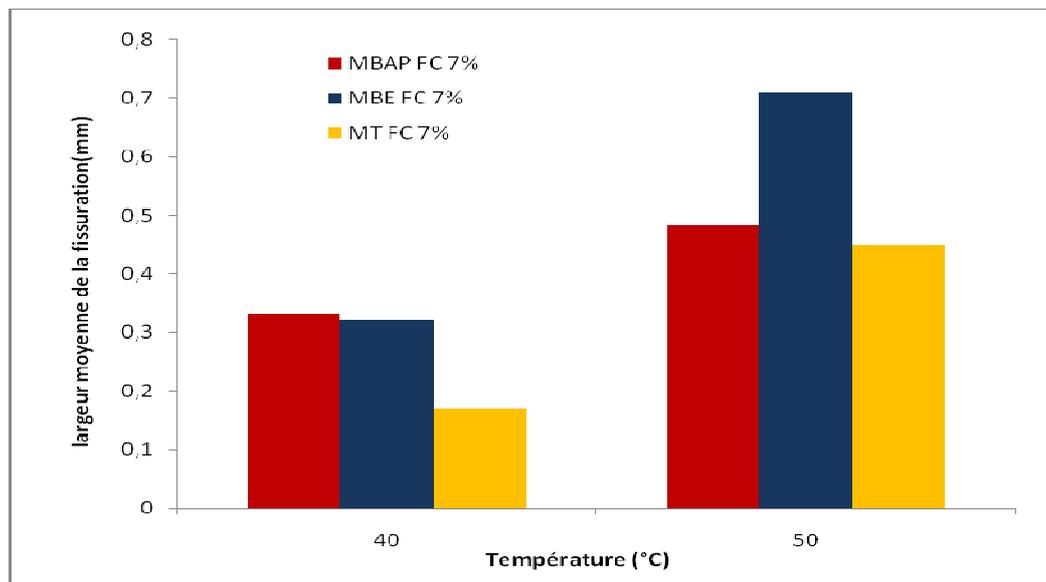


Figure 4.32 : La largeur de la fissuration en fonction de la température des différents mortiers.

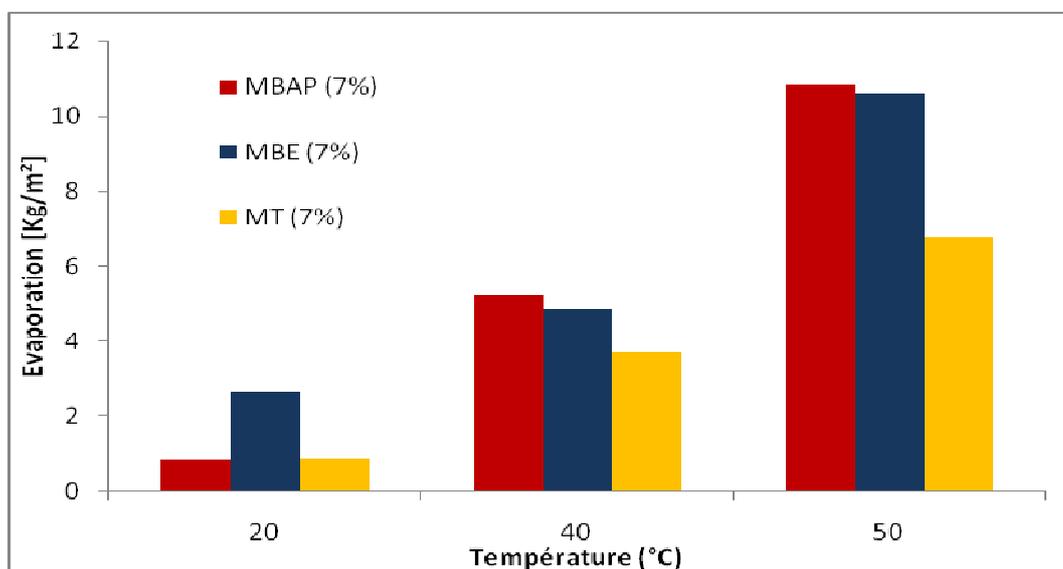


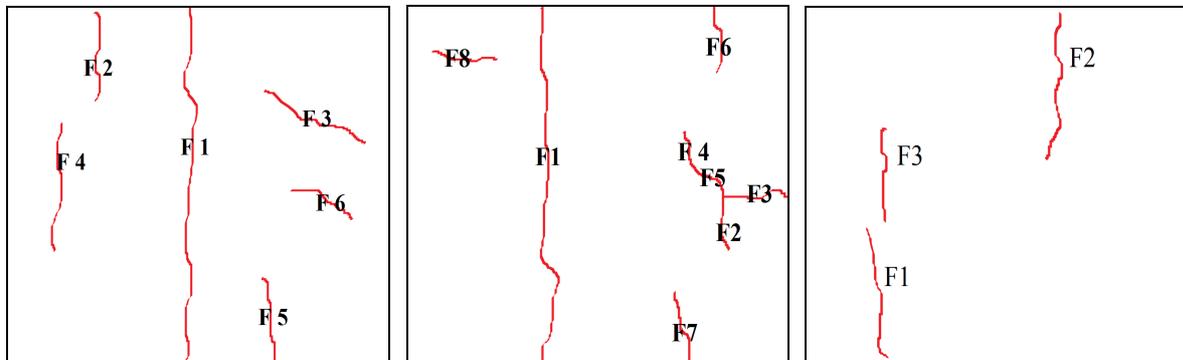
Figure 4.33 : Le taux d'évaporation des MBAP, MBE et MT.

Si on revient à la composition des différents mortiers (figure 4.6), on constate que l'augmentation de la longueur de fissuration est en fonction de la quantité d'eau dans le mélange. L'augmentation de ce dernier engendre forcément un ressueage à cause d'un tassement lié en partie à la consolidation due à la gravité. Après l'évaporation de l'eau de ressueage au cours des premières heures à cause de la température, la pression de l'eau interstitielle diminue suite à l'apparition de ménisques sur la surface. Il en résulte un retrait, qui une fois empêché, développe des fissurations précoces.

Les figures 4.30 ,4.31 et 4.32 montrent que la déformation se développe rapidement pendant les trois premières heures à une température de 50°C et pendant les cinq premières heures à

une température de 40°C. Il est à mentionner qu'à une température ambiante (20°C) aucune fissuration n'a été visible.

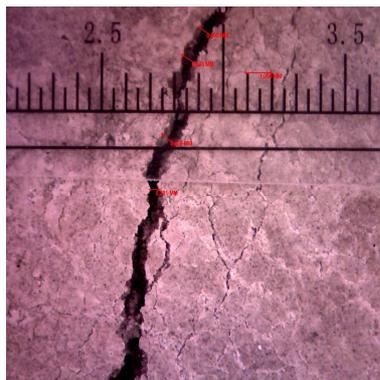
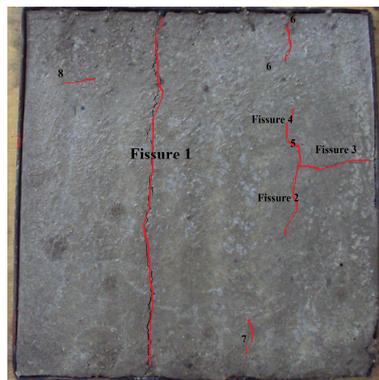
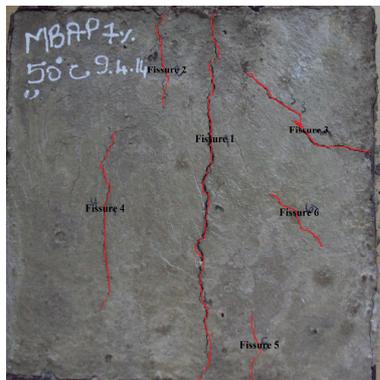
Pour mieux apprécier les résultats, les figures (4.34 (a) et (b)) montrent les états des surfaces des différents mortiers selon la température d'exposition.



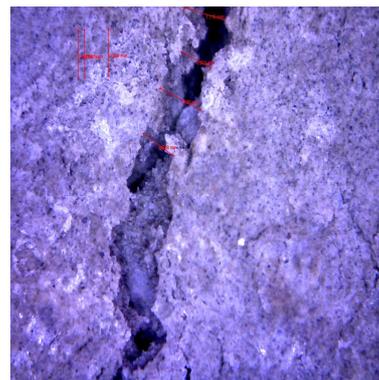
MBAP 50°C

MBE 50°C

MT 50°C



MBAP 50°C

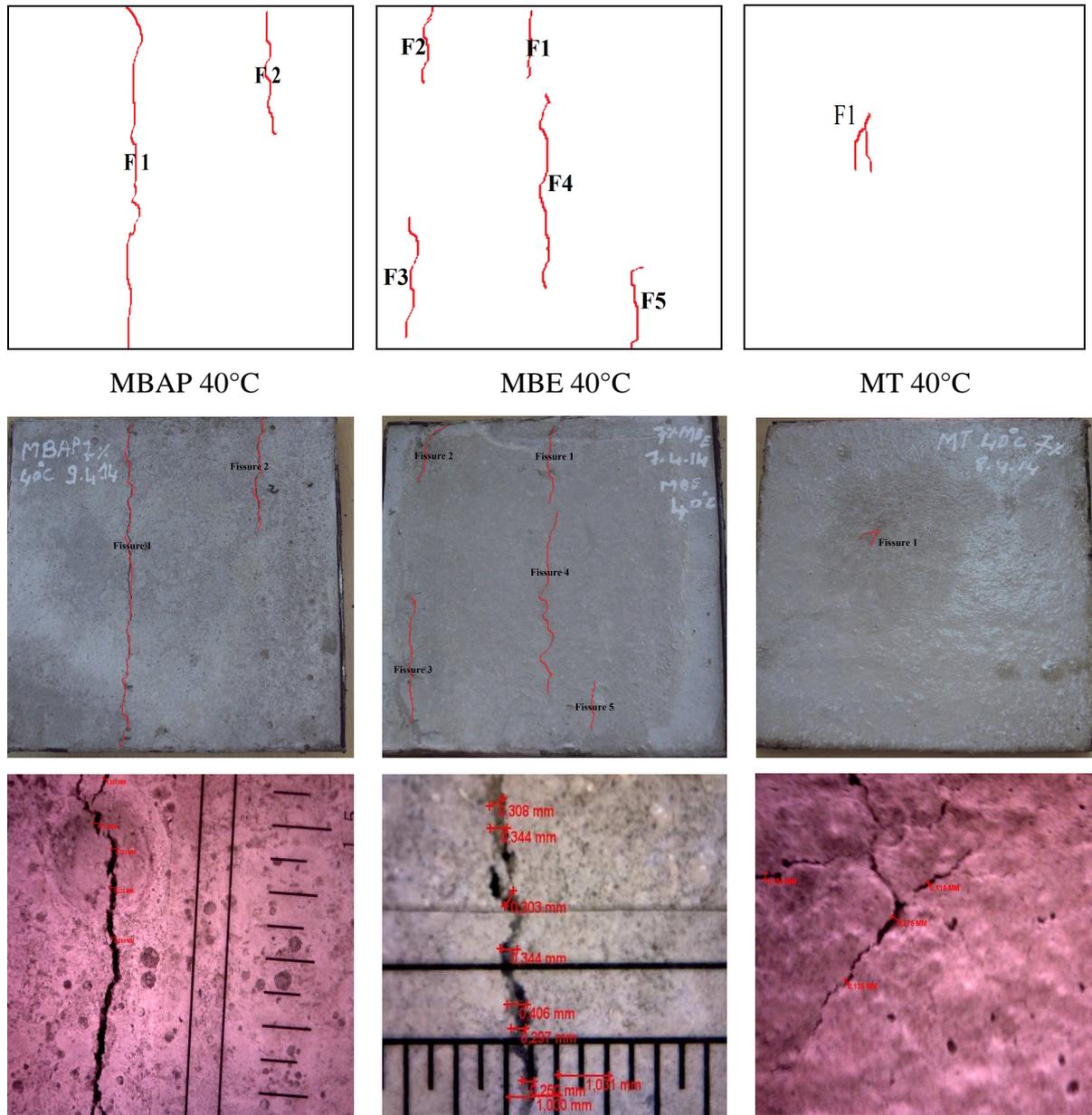


MBE 50°C



MT 50°C

(a) Température = 50°C



(b) Température = 40°C

Figure 4.34: les états de surfaces des différents mortiers selon la température d'exposition

Les figures montrent l'impact de la température sur une petite surface de 400 cm² ce qui pourra causer des dégâts importants sur de grandes surfaces si des mortiers sont utilisés pour la réalisation de chapes.

Le sens de la fissuration est toujours orienté selon le sens de la disposition des barres dans le moule. Par ailleurs la cinétique du développement de la largeur de fissuration semble être différente et ne pas être dépendante du volume d'eau dans le mélange mais plutôt du volume de sable surtout à des températures très élevées (50°C) (figure 4.30). Les granulats semblent s'imposer à l'augmentation de la largeur de la fissuration.

Dans notre étude, le MBE qui est composée de la plus petite quantité de sable, a présenté les fissurations les plus larges comme le montre l'étude microscopique (figure 4.35).

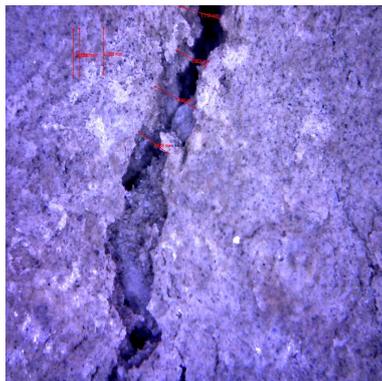


Figure 4.35: Photo microscopique de la largeur de fissuration du MBE à 50°C.

VII. CORRELATION ENTRE LA PERTE DE MASSE ET LE RETRAIT :

La perte de masse en fonction du retrait est aussi un paramètre essentiel à étudier. A partir de la figure 4.36, nous constatons que la relation entre le retrait endogène et la perte de masse reste toujours linéaire (coefficient de corrélation au-delà de 0.85)

Cette perte de masse est accélérée lorsque la pression capillaire est importante. Elle dépend essentiellement de la géométrie des pores.

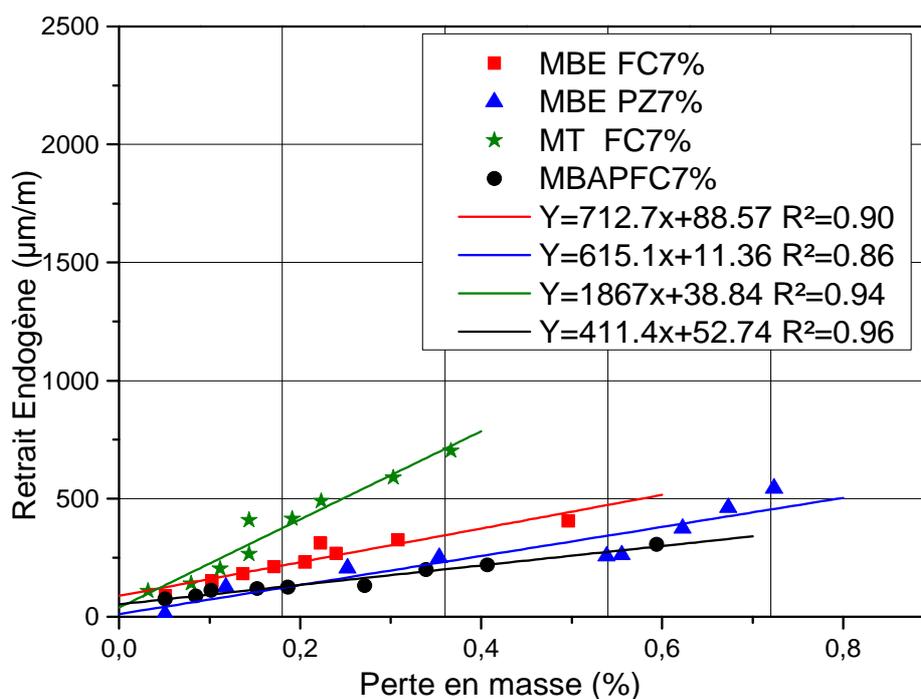


Figure 4.36 : Retrait endogène en fonction de la perte en masse.

En se basant sur la littérature, il semble être que la perte en masse au cours de cette période ne dépend pas de la nature du béton mais plutôt de la résistance (Turcry, 2004), ce qui est aussi en adéquation avec nos résultats des essais mécaniques.

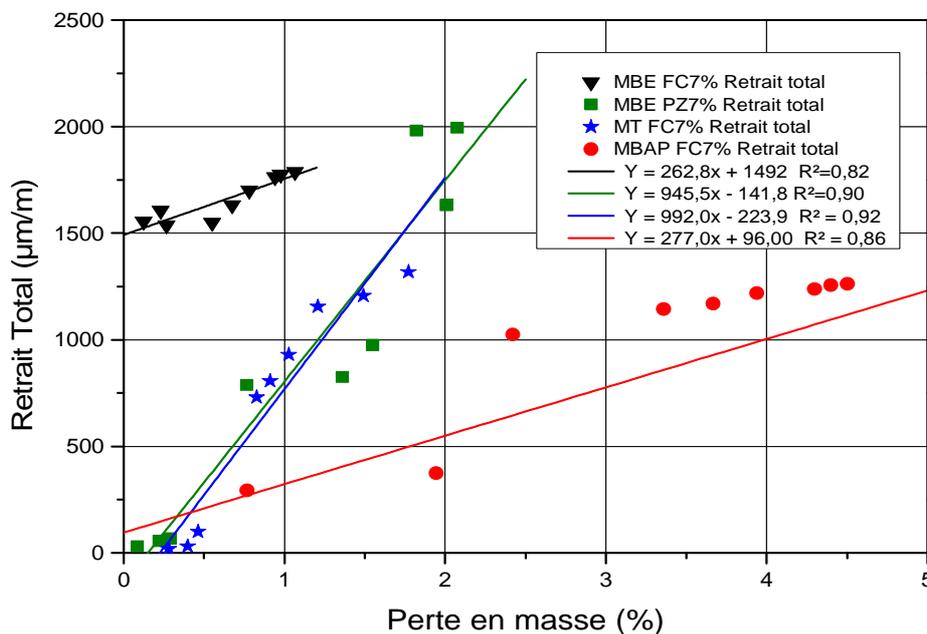


Figure 4.37 : Retrait total en fonction de la perte en masse.

La figure 4.37 confirme qu'il y a aussi une relation linéaire entre la perte de masse et le retrait total.

VIII. ETUDE DES RESISTANCES MECANIQUES :

La figure 4.38, montre que la substitution de ciment par des additions calcaires ou pouzzolaniques ne sera pas sans conséquence sur les résistances mécaniques.

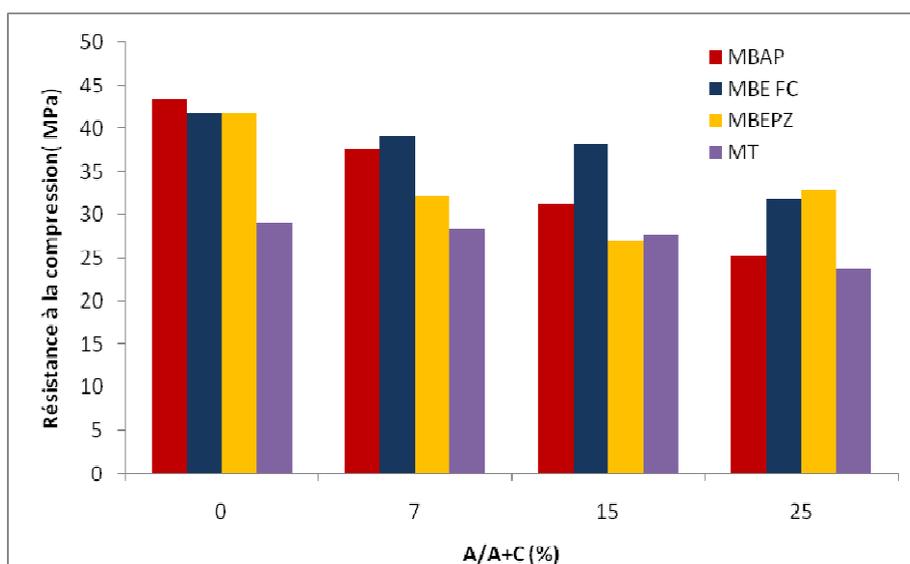


Figure 4.38 : Résistance à la compression des mortiers étudiés en fonction du taux de substitution

La résistance mécanique en compression est inversement proportionnelle à la teneur en addition Cette modification se traduit par la réduction du volume des hydrates formés d'où des résistances plus faible.

Les mortiers MBE à base de fillers calcaires présentent de meilleurs résistances par rapport aux MBE à base de pouzzolane. Cela peut être expliqué par le fait que la pouzzolane influt sur la résistance à long terme. Par ailleurs, les fillers calcaires influent sur la résistances à la compression particulièrement à jeunes âges en tant que sites de nucléation pour les hydrates de silicate de calcium.

D'un autre coté, nous constatons que les mortiers MT présentent les résistance les plus basses car ils contiennent une quantité de ciment plus faible.

Les résultats obtenus lors des essais de flexion (figure 4.39) confirment les résultats des essais de compression.

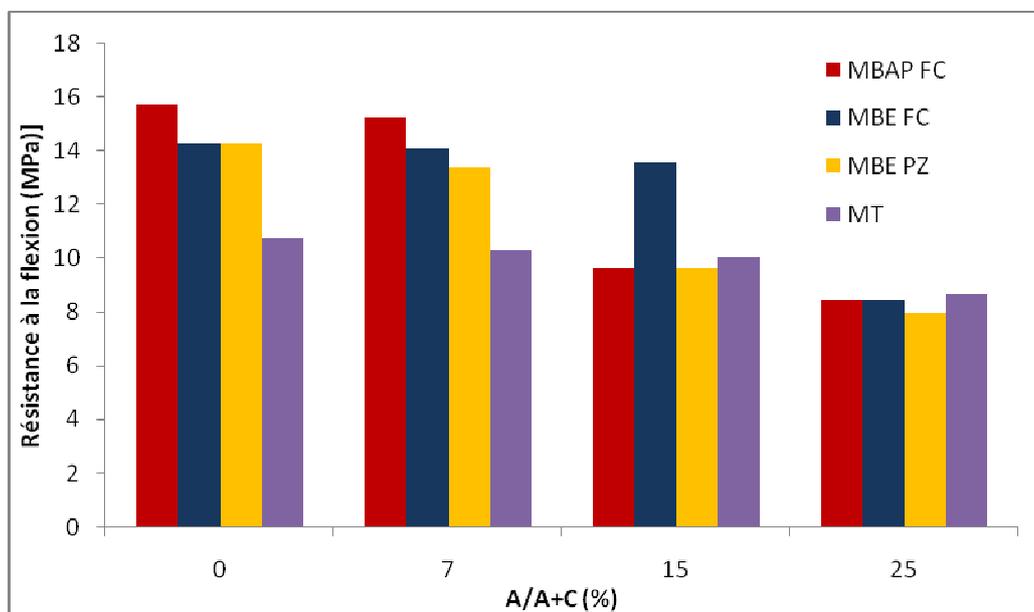


Figure 4.39 : Résistance à la flexion des mortiers étudiés en fonction du taux de substitution

IX. BILAN :

A l'état frais, les essais d'étalement au mini cône ont montré que les mortiers (MBAP et MBE), présentent les meilleures maniabilités à cause de l'augmentation du dosage en liant, contrairement au mortier MT. Les mortiers (MBAP et MBE) peuvent être formulés pour la confection des chapes autoplçantes.

Pour les MBE, une substitution au-delà de 15% de ciment par les fillers calcaires affecte significativement les paramètres rhéologiques (τ_0 et μ) qui augmentent rapidement, par contre

le seuil de cisaillement et la viscosité des mortiers à base de la pouzzolane diminuent en fonction de la croissance du taux de substitution. D'autre part, nos résultats montrent aussi que le seuil de cisaillement (τ_0) et la viscosité (μ) augmentent en fonction du rapport F/F+C pour les MBAP.

L'utilisation de la pouzzolane a permis l'obtention des mortiers plus fluides avec des viscosités plus faibles. Malheureusement, cet avantage est accompagné d'un retrait plus important et une chute de la résistance à la compression. Apparemment, les viscosités étaient trop faibles pour assurer un mortier de qualité.

De l'étude du retrait des MBE, nous avons constaté l'apport bénéfique des fillers calcaires et plus particulièrement sur le retrait endogène. Le retrait total est toujours plus important, car il est la somme du retrait endogène et du retrait de dessiccation.

Nous remarquons aussi que le retrait endogène des MBAP est moins important que celui des MBE et qui est lui même inférieur que celui des MT à cause de la grande fluidité des MBAP par rapport aux deux autres mortiers. Pour le retrait total, la cinétique est différente.

Le retrait endogène des MT est plus élevé car les pressions capillaires sont plus fortes. Ce n'est pas le cas pour le retrait total car ceci est du à l'augmentation de la fraction volumique du sable qui est moins déformable que celle de la pâte.

Une relation linéaire est toujours constatée entre le retrait et la perte de masse pour n'importe quel mortier étudié.

Avec l'augmentation de la température, l'amplitude de la fissuration semblent se développer rapidement au cours des premières heures, car l'eau interstitielle est consommée par l'hydratation et le séchage. Il est à conseiller, en pratique, de prévoir des produits de cure dans les mélanges.

X. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 4 :

AITCIN P-C., 2001 : « Bétons haute performance », Edition Eyrolles, France.

ALRIFAI A., AGGOUN S., CABRILLAC R., 2008 :« Influence des Paramètres de Formulation sur le Retrait Endogène des Pâtes et des Mortiers », Issus de BAP, XXVIe Rencontres universitaires de Génie Civil, Nancy.

BOUASKER M., 2007: “Etude numérique et expérimentale du retrait endogène au très jeunes âge des pates de ciment avec et sans inclusions”, Thèse de Doctorat, Université de Nantes.

LANOS C., & ESTELLE P., 2009 : « Vers une réelle rhéométrie adaptée aux bétons frais », *In European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Pages 457-471.

SAMOUH H., ROZIERE E., & LOUKILI A., 2012 : « Interprétation des mesures du retrait de dessiccation des bétons autoplaçants (BAP) », Centrale Nantes, France. XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie.

SCHWARTZENTRUBER A. & CATHERINE C., 2000 : « La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) – Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvés », *Matériaux et Constructions*, Vol. 33, pages 475-482.

SU N., HSU K.CH., & CHAI H.W., 2001 : “A simple mix design method for self-compacting concrete”, *Cement and concrete Research* 31, Pages 1799-1807.

TURCRY Ph., 2004 : “Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants – Influence de la Formulation”, thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les objectifs fixés dans cette étude étaient de montrer l'influence de certains paramètres de composition et de la température sur la cinétique du retrait pour des mortiers dérivés des bétons autoplaçants.

Pour ce faire, quatre types de mortiers confectionnés avec différents taux de substitution du ciment par des fillers calcaires ou de la pouzzolane ont été étudiés. Cette étude a nécessité l'utilisation de plusieurs dispositifs expérimentaux avec des protocoles d'essais adaptés aux compositions des mélanges.

Sur la base des résultats exposés précédemment, nous pouvons d'abord conclure que les mortiers MBE et MBAP étudiés présentent des caractéristiques autoplaçantes, pouvant ainsi être proposés pour la confection des chapes autoplaçantes. L'apport de la pouzzolane a été plus bénéfique sur le plan rhéologique et a permis de réduire la viscosité des compositions, augmentant ainsi la fluidité des mélanges.

Par ailleurs, le retrait a été observé pendant toute la période de l'étude avec une amplitude plus importante pendant la première semaine. Au cours de cette période et concernant le mûrissement du mélange, il est donc nécessaire de procéder soit par arrosage soit en le couvrant par une membrane de mûrissement.

Le retrait est aussi très influencé par le taux de substitution du ciment par des additions. Ces dernières permettent d'atténuer le phénomène, en particulier les fillers calcaires qui ont permis l'obtention de mortiers moins sensibles au retrait.

Les investigations sur le mortier MT ont montré que la cinétique du retrait endogène dépend du rapport E/L par contre le retrait total est fonction de la teneur en sable.

Par ailleurs, tous les types de retrait s'accompagnent toujours par une perte de masse. Cette relation est toujours linéaire. La pente de la droite dépend de la géométrie des pores.

Nous avons pu confirmer, en laboratoire, qu'à des températures élevées, la fissuration devient précoce. Elle est due au départ d'eau par évaporation. En pratique, il est par conséquent plus sûr de commencer le mûrissement à l'eau aussitôt que possible avant même la prise initial. Un mûrissement tardif ou encore une absence de tout mûrissement à l'eau peut être catastrophique du point de vue fissuration.

Le remplacement d'une quantité de ciment par un ajout cimentaire tel que les fillers calcaires ou la pouzzolane est important sur le plan économique, mais ne sera pas sans conséquence sur

les caractéristiques mécaniques. Néanmoins l'ensemble des mortiers présentent des résistances intéressantes surtout ceux à base de fillers calcaires.

Perspectives :

Ce mémoire a ouvert la voie à des sujets intéressants dans le domaine du retrait. Il est d'ailleurs important de faire des essais à l'échelle du béton autoplaçant afin d'identifier le mortier qui présente une cinétique du retrait la plus proche. Comme il est aussi important de réaliser des études du retrait sur une durée plus longue. Une autre étude sur le retrait au très jeune âge nous paraît indispensable.

RESUME :

Grâce à des progrès scientifiques, ces dernières années ont vu une révolution dans le domaine du béton, avec l'apparition de bétons plus résistants, plus durables, ainsi que des bétons plus fluides appelés auto – plaçants (BAP) qui améliorent d'ailleurs considérablement l'esthétique et la mise en place.

En plus, des mortiers autoplaçants dérivés des BAP ont aussi connu un véritable succès, au cours de cette dernière décennie, puisqu'ils sont souvent confectionnés pour la réalisation des chapes.

Par ailleurs, le volume d'un élément en béton ou en mortier diminue au cours du temps. Ce phénomène connu sous l'appellation du retrait est dû à l'hydratation du ciment et au séchage. En plus, si ce retrait est gêné ou empêché ou le béton est exposé à des températures élevées, ce dernier sera soumis à des efforts de traction, qui le place dans une situation de fissuration précoce.

Dans notre étude, nous avons d'abord formulé des bétons autoplaçants (BAP) et des mortiers dérivés (MBE, MBAP et MT) sur lesquels nous avons réalisé des essais rhéologiques.

Afin de justifier l'emploi de ces mortiers à caractère autoplaçant dans la confection de chapes, nous nous sommes concentrés sur leurs comportements vis-à-vis du retrait plastique, endogène et total. Nous avons aussi jugé utile d'étudier l'influence de trois températures (20°C, 40°C et 50°C) sur le retrait plastique.

Mots clés : Retrait, fissuration, Bétons Autoplaçants, mortier, seuil de cisaillement, viscosité, additions minérales, superplastifiants.

ABSTRACT:

Thanks to scientific advances, the recent years have seen a revolution in the field of concrete, with the emergence of more resistant concrete, more sustainable and more fluid concretes called Self Compacting Concrete (SCC) which greatly improves the esthetic and the setting up.

In addition, the self compacting mortars derived from the SCC have also been highly successful during the last decade; they are often made to realize screeds.

Furthermore, the volume of an element of concrete or mortar decreases over the time, this phenomenon known as shrinkage was due to hydration of the cement and drying.

In addition, if the shrinkage is hindered, prevented or exposed to high temperatures, the concrete is subjected to tensile efforts, which place it in a situation of early cracking.

In our study, we first made the self- consolidating concrete (SCC) and mortars derivatives (MEC, MSCC, MT) on which we performed rheological tests.

To justify the use of these compacting mortars in marking screeds, we focused on their behavior overlooked plastic shrinkage, endogenous and total shrinkage. We also found that it is useful to study the influence of three temperatures (20°, 40° and 50°) on plastic shrinkage.

Keywords: Shrinkage, cracking, self compacting concretes, mortar, yield stress, viscosity, mineral admixtures, superplasticizers.

الملخص

إن التقدم العلمي المشهود في السنوات الأخيرة في مجال الخرسانة، جعلها تصبح أكثر مقاومة، أكثر استدامة وأكثر مرونة بالإضافة إلى الخرسانة السائلة أو بالأحرى ذاتية الرص التي على غرار باقي أنواع الخرسانة تتميز بسهولة التنفيذ وجماليات المظهر. بالإضافة إلى هذا، عرفت المشتقات الخرسانة المائعة نجاحاً كبيراً خلال العقد الماضي خاصة في إنجاز الأسقف.

لكن حجمها يتقلص بمرور الوقت ويرجع ذلك إلى ترطيب الاسمنت و تجفيفه. هذه الظاهرة المعروفة باسم التقلص أو الانكماش الذي إذا تم عرقلة أو منعه أو تعرضه لدرجات حرارة عالية، يؤدي الخرسانة إلى ضغط شديد، الأمر الذي يضعها في حالة من الانشقاق في وقت مبكر من حياتها.

في دراستنا، نتطرق في البداية إلى طرق صياغة و تصميم الخلطات الخرسانية السائلة و الملاط المشتقة منها لتبرير استخدام هذه المشتقات المائعة، ركزنا على سلوكها من حيث التقلص البلاستيكي، الذاتي و الكامل. كما ارتأينا إلى دراسة تأثير ثلاثة درجات الحرارة (20 درجة و 40 درجة و 50 درجة) على التقلص البلاستيكي.

كلمات البحث :

تقلص ، تشقق ، الخرسانة الذاتية الرص ، الملاط ، عتبة القص ، اللزوجة ، المضافات المعدنية ، المدن الفائق.