

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955-Skikda
Faculté des Technologies
Département de Génie civil
Ref : D012117002D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat

Option : Géo-matériaux

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT DES
BETONS AUTOPLAÇANTS A BASE DES FINES
RECYCLEES.
Formulation – Caractérisation – Propriétés – Durabilité**

Présentée par :
BENSALEM Sara

Soutenue publiquement le 30 Avril 2017

Devant le jury composé de :

Mr. MESSASSET Salah	Professeur.	Président.	Université 20 Aout 1955, Skikda
Mr. HOUARI Hacène	Professeur.	Rapporteur	Université Mentouri, Constantine
Mr. BELACHIA Mouloud	Professeur.	Rapporteur	Université 20 Aout 1955, Skikda
Mr. BENOUIS Abdelhalim	Professeur.	Examineur	Université 8 Mai 1945, Guelma
Mme. HEBHOUB Houria	Docteur.	Examinatrice	Université 20 Aout 1955, Skikda

REMERCIEMENTS

*Ce mémoire de thèse est certes l'aboutissement d'un travail personnel mais c'est surtout le résultat du travail d'un groupe. Je tiens à remercier ici tous ceux qui ont contribué à sa réalisation bien sur Professeur **HOUARI Hacène** en tête de liste autant que encadreur, dirigeant et des fois un vrai père par ses conseils, encouragements et soutien. Je le remercie pour sa confiance, et pour son aide scientifique et qui par son expérience et ses compétences m'a transmis sa passion pour la recherche. Je tiens également à lui exprimer toute ma gratitude, pour ses remarques qui m'ont aidé à avoir un regard extérieur et du recul sur mes travaux, pour sa rigueur scientifique, ses critiques constructives et ses conseils avisés, qui m'a transmis son savoir et m'a aidé à réaliser tous mes objectifs.*

Sans son aide, ce document n'aurait pas vu le jour.

*Je remercie aussi mon Co-encadreur Monsieur **BELACHIA Mouloud**, Professeur au Département de Génie Civil à l'université 20 Aout 1955 de Skikda, pour son accueil et le partage de ses connaissances, ses expériences et ses conseils.*

*Je tiens également à remercier Mlle **AMOURI Chahinez**, Docteur au Département de Génie Civil à l'université Mentouri Constantine, pour le partage de ses connaissances, ses expériences et ses nombreux conseils avisés, elle était, et est, la personne sur qui j'ai pu toujours compter. Elle était, et est, vraiment une véritable sœur pour moi.*

Je voudrais exprimer ma gratitude à tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail . . .

*Je suis gré à Monsieur **MESSASSET Salah**, Professeur à l'université 20 Aout 1955 - Skikda de m'avoir fait l'honneur de présider le Jury de soutenance.*

*Je tiens à remercier Monsieur **BENOUIS Abdelhalim**, Professeur à l'université 8 Mai 1945 - Guelma, d'avoir accepté la lourde tâche d'être examinateur de cette thèse et pour ses critiques judicieuses.*

*Je remercie cordialement, Madame **HEBHOUB Houria**, Docteur de l'université 20 Aout 1955 Skikda d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

Mes remerciements et ma reconnaissance sont adressés envers Belkadi Raouf pour son soutien et son aide lors des différentes expérimentations mais aussi pour sa bonne humeur qu'il sait partager généreusement.

Mes plus vifs remerciements vont également à mes amis Djihen et Amel que j'ai partagé avec eux des moments inoubliables pendant mes études.

Je terminerai en remerciant de tout mon cœur ma famille et en particulier ma mère qui m'a soutenu durant mes études et qui m'a toujours encouragé. Sa générosité est inestimable. Qu'elle trouve ici le témoignage de mon affection. Je lui dédie ce mémoire.

RESUME

L'utilisation des bétons autoplaçants revêt un intérêt particulier sous l'éclairage du développement durable. Afin de les optimiser d'un point de vue environnemental, il est nécessaire de réduire leur dosage en ciment à travers le remplacement d'une partie du ciment par des ajouts minéraux lors de sa fabrication.

Malgré l'existence d'une variété des ajouts minéraux tels que les cendres volantes, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau, les fillers calcaires, il reste encore d'autres déchets industriels non utilisés, comme les déchets de verre et les déchets de marbre.

Le but de cette étude est de déterminer la faisabilité du remplacement total des fillers calcaires par des fines recyclées de nature différente tel que la poudre de marbre, poudre de verre et le laitier granulé de haut fourneau dans la fabrication des bétons autoplaçants.

Le programme expérimental repose sur une étude comparative des comportements mécaniques instantanés et différés ainsi que la résistance au gel modéré de deux séries de BAP de même formulation ne se différenciant que par le rapport F/L (0.1 et 0.2) et la nature des fines recyclées.

Cette démarche expérimentale se caractérise par son approche performantielle. D'abord, la capacité à produire des BAPs avec ces fines, tout en respectant les recommandations de l'EFNARC à l'état frais, a été vérifiée. Ensuite, le comportement mécanique instantané (résistance en compression, en traction par flexion et module d'élasticité) ainsi que les déformations différées, retrait et fluage en flexion quatre points, endogènes et de dessiccation, ont été étudiés. Enfin, l'évaluation de la résistance aux cycles gel-dégel en conditions hivernales locales a été effectuée.

Les résultats obtenus montre que l'introduction des fines recyclées dans la production des BAPs à un effet bénéfique sur leur comportement différé que ce soit le retrait libre ou le fluage flexionnel notamment les BAPs contenant de la poudre de verre ou le laitier de haut fourneau. De point de vue durabilité, le laitier de haut fourneau et la poudre de verre génèrent des meilleures résistances aux cycles gel dégel que les fillers calcaires.

Mots clés : Béton autoplaçant – Fines recyclées – Performances mécaniques – Retrait – Fluage flexionnel – Résistance aux gel-dégel.

ABSTRACT

The use of self-compacting concrete is of particular interest in light of sustainable development. In order to optimize them from an environmental point of view, it is necessary to reduce their cement dosage by replacing part of the cement with mineral additions during its manufacture.

Despite the existence of a variety of mineral additions such as fly ash, silica fume, blast furnace slag, limestone fillers, there are still other unused industrial wastes such as glass and marble wastes.

The aim of this study is to determine the feasibility of using recycled fines (marble powder, glass powder and granulated slag) as total replacement to limestone powder in the production of self-compacting concrete.

The experimental program is based on a comparative study of instant and delayed mechanical behaviors as well as freeze-thaw resistance of two SCCs series of the same formulation differ only by the recycled fines nature and Fine/Binder ratio.

This experimental approach is characterized by its performance-based approach. First, the ability to produce SCC with these fines while respecting the EFNARC recommendations in the fresh state was checked. The instantaneous mechanical behavior (compressive strength and flexural strength) and deferred deformations, endogenous and drying flexural creep and shrinkage were investigated. Finally, the evaluation of SCC freeze-thaw resistance was performed.

The obtained results show that the introduction of recycled fines in the production of SCC has a beneficial effect on their delayed behavior, whether shrinkage or flexional creep, in particular SCC containing glass powder or blast furnace slag. From durability point of view, blast furnace slag and glass powder generate better resistance to freeze-thaw cycles than limestone fillers.

Keywords: Self-compacting concrete - Recycled fines – Mechanical performance - Shrinkage - Flexural creep - Freeze-thaw resistance.

ملخص

استخدام الخرسانة ذاتية القولبة له أهمية خاصة في ضوء التنمية المستدامة. للحصول على خرسانة ذاتية القولبة مثالية من وجهة نظر بيئية، من الضروري الحد من محتوى الاسمنت من خلال استبداله جزئياً بالمضافات المعدنية. وعلى الرغم من وجود مجموعة متنوعة من المضافات المعدنية مثل الرماد المتطاير، السيليكا، خبث الأفران العالية، والحشو الحجر الجيري، لا يزال هناك البعض النفايات الصناعية غير المستخدمة مثل نفايات الزجاج و الرخام.

ان الهدف من دراستنا تحديد إمكانية استبدال الحشو الحجر الجيري بالمساحيق المعاد تدويرها كمسحوق الرخام، مسحوق الزجاج وخبث الأفران العالية في إنتاج الخرسانة ذاتية القولبة وتأثيرها على الانسحاب، الزحف و مقاومة التجميد و الذوبان.

يستند البرنامج التجريبي على دراسة مقارنة للسلوك الميكانيكي اللحظي والمؤجل بالإضافة إلى مقاومة التجميد و الذوبان لمجموعتين من خرسانات ذاتية القولبة تتميز بنفس صياغة وتختلف فقط من حيث طبيعة المسحوق و النسبة (F/L).

يتميز هذا المنهج التجريبي بواسطة النهج القائم على أدائها. أولاً، تم التحقق من القدرة على إنتاج خرسانة ذاتية القولبة بهذه المساحيق المعاد تدويرها مع احترام توصيات EFNARC. ثم تم التحقيق في السلوك الميكانيكي اللحظي و التشوهات المؤجلة، الزحف و الانكماش. وأخيراً، تم إجراء تقييم لمقاومة الصقيع المعتدل.

النتائج تسلط الضوء على تأثير طبيعة مساحيق المعاد تدويرها على التشوهات المؤجلة ومقاومة التجميد الذوبان في الخرسانة ذاتية القولبة.

وتبين النتائج أن استعمال المساحيق المعاد تدويرها في إنتاج الخرسانة ذاتية القولبة له تأثير مفيد و إيجابي على سلوكهم المؤجل إما الانسحاب أو زحف مقوس خاصة الخرسانة التي تحتوي على مسحوق الزجاج أو خبث الأفران العالية. من منظور الاستدامة، خبث الفرن ومسحوق الزجاج يولدان مقاومة التجميد و الذوبان أفضل من الحشو الحجر الجيري.

الكلمات الرئيسية: الخرسانة ذاتية القولبة - المساحيق المعاد تدويرها - الخواص الميكانيكية - الانكماش - الزحف المقوس - مقاومة التجميد و الذوبان.

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	iii
ABSTRACT	iv
ملخص	v
TABLE DES MATIERES.....	vi
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
LISTE DES PHOTOS.....	xv
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : NOTIONS SUR LES AJOUTS MINERAUX DANS LES MATRICES CIMENTAIRES	4
I.1. INTRODUCTION	4
I.2. CIMENT PORTLAND.....	4
I.3. HYDRATATION DU CIMENT	5
I.4. LES AJOUTS MINERAUX.....	6
I.5. ACTION DES AJOUTS MINERAUX SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRES	7
I.5.1. EFFET PHYSIQUE	8
I.5.2. EFFET PHYSICO-CHIMIQUE	8
I.5.3. EFFET CHIMIQUE.....	8
I.6. REACTIVITE DES AJOUTS CIMENTAIRES.....	9
I.6.1. AJOUTS A HYDRAULICITE LATENTE.....	9
I.6.2. AJOUTS POZZOLANQUES	9
I.6.3. AJOUTS INERTES	10
I.7. FILLER CALCAIRE.....	11
I.8. LAITIER A HAUT FOURNEAU	12
I.9. LA POUDRE DE VERRE	16
I.10. POUDRE DE MARBRE.....	17

I.11. CONCLUSION	18
CHAPITRE II : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	19
II.1. INTRODUCTION	19
II.2. PROPRIETES MECANIQUES	19
II.3. RETRAIT	23
II.4. LE FLUAGE	27
II.5. RESISTANCE AUX CYCLES GEL-DEGEL	28
II.6. CONCLUSION	30
CHAPITRE III : ELABORATION ET CARACTERISATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS A BASE DES FINES RECYCLEES RETENUES.	32
III.1. INTRODUCTION	32
III.2. MATERIAUX DE BASE UTILISES	32
III.2.1. GRANULATS	32
III.2.2. CIMENT	35
III.2.3. AJOUTS MINERAUX	36
□ FILLER CALCAIRE	36
□ LAITIER GRANULE DE HAUT FOURNEAU	37
□ LA POUDRE DE VERRE	38
□ LA POUDRE DE MARBRE	39
III.2.4. EAU DE GACHAGE	40
III.2.5. ADJUVANT	40
III.3. COMPOSITIONS DES MELANGES RETENUS	41
III.3.1. METHODE DE FORMULATION ADOPTEE	41
III.3.2. LES ETAPES DU CALCUL	42
III.3.3. FORMULATIONS RETENUES	46
III.4. FABRICATION ET CURE	46
III.4.1. FABRICATION	47
III.4.2. MISE EN PLACE	48
III.4.3. CURE	48

III.5. ESSAIS DE CARACTERISATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS	49
III.5.1. A L'ETAT FRAIS	49
III.5.2. A L'ETAT DURCI	51
III.6. RESULTATS ET DISCUSSIONS	52
III.6.1. VALIDATION SUR LES BAPS A L'ETAT FRAIS.....	53
□ <i>Capacité de remplissage</i>	<i>53</i>
□ <i>Capacité de passage</i>	<i>56</i>
□ <i>Résistance à la ségrégation</i>	<i>57</i>
□ <i>L'air occlus et la densité.....</i>	<i>58</i>
III.6.2. PERFORMANCES DES BAPS A L'ETAT DURCI	60
□ <i>RESISTANCES A LA COMPRESSION</i>	<i>60</i>
□ <i>RESISTANCES A LA TRACTION PAR FLEXION</i>	<i>62</i>
□ <i>MODULE D'ELASTICITE</i>	<i>63</i>
III.7. CONCLUSION	65
CHAPITRE IV : ETUDE DU COMPORTEMENT DIFFERE DES BETONS AUTOPLAÇANTS A BASE DES FINES RECYCLEES RETENUES.....	67
IV.1. INTRODUCTION	67
IV.2. ETUDE DE RETRAIT	67
IV.2.1. GENERALITES SUR LE PHENOMENE DE RETRAIT	67
IV.2.1.1. MECANISMES DE RETRAIT ENDOGENE.....	68
IV.2.1.2. MECANISMES DE RETRAIT DE DESSICCATION	69
IV.2.2. CAMPAGNE EXPERIMENTALE DU RETRAIT	71
IV.2.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	72
IV.2.3.1. RETRAIT TOTAL	73
IV.2.3.2. RETRAIT ENDOGENE	75
IV.2.3.3. RETRAIT DE DESSICCATION	76
IV.2.3.4. LA PERTE EN POIDS.....	77
IV.2.3.5. RELATION RETRAIT – PERTE EN POIDS	79
IV.2.3.6. CONFRONTATIONS DES RESULTATS DE RETRAIT AVEC LES CODES	80

IV.2.4. BILAN	80
IV.3. ETUDE DE COMPORTEMENT DIFFERE EN FLEXION QUATRE POINTS	81
IV.3.1. GENERALITES SUR LE PHENOMENE DE FLUAGE	81
IV.3.1.1. MECANISMES DE FLUAGE ENDOGENE	82
<input type="checkbox"/> FLUAGE PROPRE A COURT TERME	82
<input type="checkbox"/> FLUAGE PROPRE A LONG TERME	83
IV.3.1.2. MECANISMES DE FLUAGE DE DESSICCATION	84
<input type="checkbox"/> FLUAGE DE DESSICCATION STRUCTURAL	84
<input type="checkbox"/> FLUAGE DE DESSICCATION INTRINSEQUE	85
IV.3.2. CAMPAGNE EXPERIMENTALE DU FLUAGE EN FLEXION 4 POINT	86
<input type="checkbox"/> DETERMINATION DE LA CHARGE DE RUPTURE	86
<input type="checkbox"/> PROCEDURE EXPERIMENTALE	88
<input type="checkbox"/> DISPOSITIF DE FLUAGE EN FLEXION QUATRE POINTS	88
IV.3.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS	90
IV.3.3.1. DEFORMATION INSTANTANEE	90
IV.3.3.2. DEFORMATION DIFFEREE	91
<input type="checkbox"/> FLUAGE ENDOGENE	92
<input type="checkbox"/> FLUAGE TOTAL	93
<input type="checkbox"/> LE COEFFICIENT DE FLUAGE	94
IV.3.3.3. CONFRONTATIONS DES RESULTATS DE FLUAGE AVEC LES CODES	96
IV.3.3.4. BILAN	97
IV.4. CONCLUSION	98
CHAPITRE V : EFFET DES FINES RECYCLEES SUR LA RESISTANCE AUX CYCLES GEL-DEGEL DES BETONS AUTOPLAÇANTS.....	99
V.1. INTRODUCTION	99
V.2. GENERALITES SUR LE PHENOMENE DE GEL DEGEL	99
V.2.1. DETERIORATION PAR FISSURATION INTERNE	99
V.2.2. DETERIORATION PAR ECAILLAGE	100
V.2.3. LES MECANISMES DE DEGRADATION LIES A L'ACTION DE GEL-DEGEL	100

V.3. LA CAMPAGNE EXPERIMENTALE	102
V.3.1. LES TESTS DU GEL-DEGEL	102
V.3.2. ESSAIS DE DETERMINATION DES PROPRIETES RESIDUELLES	103
V.4. RESULTATS ET DISCUSSION	105
V.4.1. VARIATIONS DIMENSIONNELLES	105
V.4.2. EVOLUTION DES FREQUENCES DE RESONANCE	105
V.4.3. VARIATIONS DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION	107
V.4.4. VARIATIONS DE LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION	109
V.4.5. OBSERVATIONS VISUELLES DE LA DEGRADATION	110
V.5. CONCLUSION	111
CONCLUSION GENERALE	113
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	116
RÉFÉRENCES NORMATIVES	133
ANNEXE A : CALCUL DES INCERTITUDES	135
ANNEXE B : CONSIDERATION DU RETRAIT ET FLUAGE DANS LES CODES OU REGLEMENTS	139

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : NOTIONS SUR LES AJOUTS MINÉRAUX DANS LES MATRICES
CIMENTAIRES

<i>Figure I. 1 : Diagramme de Rankin [Adam, 2014]</i>	7
<i>Figure I. 2: illustration de l'effet filler [Diederich, 2010].</i>	12
<i>Figure I. 3: Evolution de la résistance à la compression de laitiers granulés de haut fourneau en fonction de l'indice de basicité CaO/SiO₂ [Houze, 2013].</i>	14

CHAPITRE II : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

<i>Figure II. 1: Résistance mécanique des bétons autoplaçants avec différentes additions (fillers calcaires, poudre de marbre, poudre de basalte) [Uysal et al, 2011a]</i>	20
<i>Figure II. 2: L'évolution de la résistance en fonction de l'âge d'un BAP réalisé avec différents dosages de laitier [Boukendakdji, 2012].</i>	21
<i>Figure II. 3: L'évolution de la résistance à la compression et à la flexion des BAPs en fonction de la teneur en poudre de verre [Vanjare et al, 2012].</i>	23
<i>Figure II. 4: L'évolution de retrait pour des BAPs avec différentes combinaisons de fines [Guneyisi et al, 2010].</i>	25
<i>Figure II. 5: L'évolution de fluage pour des BAPs [Kavanaugh et al, 2008]</i>	28

CHAPITRE III : ELABORATION ET CARACTÉRISATION DES BÉTONS
AUTOPLAÇANTS À BASE DES FINES RECYCLÉES RETENUES

<i>Figure III. 1: Caractéristiques géométriques par voie sèche des granulats utilisés.</i>	33
<i>Figure III. 2: Les phases de malaxage.</i>	47
<i>Figure III. 3: Résultats de l'essai d'étalement.</i>	54
<i>Figure III. 4: Résultats de l'essai V- Funnel.</i>	56
<i>Figure III. 5 : Résultats de l'essai Boite en L.</i>	57
<i>Figure III. 6: Résultats de l'essai de stabilité au tamis</i>	58
<i>Figure III. 7: Résultats de l'essai de l'air occlus.</i>	59
<i>Figure III. 8: Résultats de la densité.</i>	59
<i>Figure III. 9: L'évolution de la résistance à la compression.</i>	60
<i>Figure III. 10: L'évolution de la résistance à la traction par flexion.</i>	63
<i>Figure III. 11: L'évolution du module d'élasticité des BAPs.</i>	64

CHAPITRE IV : ETUDE DU COMPORTEMENT DIFFERE DES BETONS
 AUTOPLAÇANTS A BASE DES FINES RECYCLEES RETENUS

<i>Figure IV. 1: Interface liquide/gaz dans un pore non saturé.</i>	68
<i>Figure IV. 2: Autocontraintes de structure dues au retrait de séchage [Pons, 1998] cité par [Ollivier, 2008]</i>	69
<i>Figure IV. 3: L'évolution des déformations de retrait total.</i>	73
<i>Figure IV. 4: L'évolution des déformations de retrait endogène.</i>	75
<i>Figure IV. 5 : L'évolution des déformations de retrait de dessiccation</i>	76
<i>Figure IV. 6: L'évolution de la perte en poids des BAPs.</i>	78
<i>Figure IV. 7: L'évolution de retrait total des BAPs en fonction de la perte en poids.</i>	79
<i>Figure IV. 8: Mécanismes du fluage propre à court terme [Ulm et al, 1999]</i>	83
<i>Figure IV. 9: Mécanismes du fluage propre à long terme [Ulm et al, 1999].</i>	84
<i>Figure IV. 10: Effet d'un chargement sur un béton en dessiccation [Pons, 1998].</i>	85
<i>Figure IV. 11: Poutrelle utilisée pour l'étude de comportement des mélanges en flexion</i>	86
<i>Figure IV. 12 : Les déformations instantanées sous charge constante.</i>	91
<i>Figure IV. 13: Evolution des déformations de fluage endogène des BAPs.</i>	92
<i>Figure IV. 14: Evolution des déformations de fluage total des BAPs.</i>	93
<i>Figure IV. 15 : Le Coefficient de fluage total</i>	95
<i>Figure IV. 16 : Le Coefficient de fluage endogène</i>	96

CHAPITRE V : EFFET DES FINES RECYCLEES SUR LA RESISTANCE AU GEL-DEGEL
 DES BETONS AUTOPLAÇANTS

<i>Figure V. 1: Représentation schématique du processus d'établissement des pressions osmotiques.</i>	101
<i>Figure V. 2: Evolution de température au cours d'un cycle du gel-dégel.</i>	103
<i>Figure V. 3: Les variations dimensionnelles en fonction du nombre de cycles.</i>	105
<i>Figure V. 4: Evolution des fréquences de résonance en fonction du nombre de cycles.</i>	106
<i>Figure V. 5: Evolution de la perte de résistance à la compression en fonction du nombre de cycles.</i>	108
<i>Figure V. 6: Evolution de la perte de la résistance à la traction par flexion en fonction du nombre de cycles.</i>	109

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : NOTIONS SUR LES AJOUTS MINERAUX DANS LES MATRICES CIMENTAIRES

<i>Tableau I. 1: Critères sur les propriétés physiques et chimiques</i>	11
---	----

CHAPITRE III : ELABORATION ET CARACTERISATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS A BASE DES FINES RECYCLEES RETENUES

<i>Tableau III. 1: Caractéristiques physiques des granulats utilisés.</i>	34
<i>Tableau III. 2: Caractéristiques chimiques des granulats utilisés.....</i>	35
<i>Tableau III. 3 : Composition chimique du ciment.....</i>	35
<i>Tableau III. 4 : Composition minéralogique du clinker.....</i>	35
<i>Tableau III. 5: Les propriétés physiques du ciment</i>	36
<i>Tableau III. 6: Composition chimique des fillers calcaires.</i>	37
<i>Tableau III. 7: Composition chimique du laitier d'El Hadjar.</i>	37
<i>Tableau III. 8: Composition chimique de la poudre de verre.</i>	38
<i>Tableau III. 9 : Composition chimique de la poudre de marbre.....</i>	39
<i>Tableau III. 10: L'analyse chimique de l'eau (mg/l).</i>	40
<i>Tableau III. 11: Les caractéristiques de superplastifiant.</i>	40
<i>Tableau III. 12: Formulation des bétons autoplaçants de référence.</i>	46
<i>Tableau III. 13: Essais de caractérisation des BAPs à l'état frais.</i>	50
<i>Tableau III. 14: Essais de caractérisation des BAPs à l'état durci.</i>	52
<i>Tableau III. 15: Résultats de la caractérisation à l'état frais des mélanges.</i>	53
<i>Tableau III. 16: Modules d'élasticité mesurés et calculés des bétons étudiés.</i>	65

CHAPITRE IV : ETUDE DU COMPORTEMENT DIFFERE DES BETONS
AUTOPLAÇANTS A BASE DES FINES RECYCLEES RETENUS

Tableau IV. 1 : Confrontation des résultats expérimentaux de retrait total avec l'Eurocode 2.
..... 80

Tableau IV. 2: Charge de rupture en flexion à 7 jours en KN. 87

*Tableau IV. 3: Confrontation des résultats expérimentaux de fluage total avec l'EC2 et le
BPEL.* 97

CHAPITRE V : EFFET DES FINES RECYCLEES SUR LA RESISTANCE AU GEL-DEGEL
DES BETONS AUTOPLAÇANTS

Tableau V. 1 : Essais de caractérisation des propriétés résiduelles. 104

LISTE DES PHOTOS

CHAPITRE III : ELABORATION ET CARACTERISATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS A BASE DES FINES RECYCLEES RETENUES

<i>Photo III. 1: Le superplastifiant utilisé.</i>	41
<i>Photo III. 2 : Malaxeur utilisé.</i>	47
<i>Photo III. 3 : Les éprouvettes utilisées (a) Cylindriques 10x20cm (b) prismatiques 7x7x28cm (c) Cylindriques 16x32cm</i>	48
<i>Photo III. 4: Conservation des éprouvettes.</i>	49
<i>Photo III. 5: Aéromètre à béton.</i>	49

CHAPITRE IV : ETUDE DU COMPORTEMENT DIFFERE DES BETONS AUTOPLAÇANTS A BASE DES FINES RECYCLEES RETENUS

<i>Photo IV. 1: (a) Positionnement des plots sur les éprouvettes de retrait (b) Appareil de mesure du retrait (Rétractomètre) (c) Conservation des éprouvettes de retrait</i>	72
<i>Photo IV. 2: Mesures de la charge de rupture.</i>	87
<i>Photo IV. 3: Eprouvette scellée et non scellée.</i>	88
<i>Photo IV. 4: le bâti de fluage [Bensalem et al, 2016].</i>	89

CHAPITRE V : EFFET DES FINES RECYCLEES SUR LA RESISTANCE AU GEL-DEGEL DES BETONS AUTOPLAÇANTS

<i>Photo V. 1: (a) Conservation des éprouvettes avant le test du gel-dégel (b) L'enceinte climatique.</i>	102
<i>Photo V. 2: L'appareil utilisé pour la détermination de la fréquence de résonance.</i>	104
<i>Photo V. 3: Les observations visuelles des dégradations.</i>	111

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie du béton a une énorme empreinte écologique sur la planète. Tout d'abord, l'épuisement progressif des ressources naturelles due aux volumes importants de matière première nécessaire pour produire les milliards de tonnes de béton dans le monde chaque année. Ensuite, les émissions de CO₂ rejetées lors de la production de ciment Portland. Outre les besoins énergétiques, la consommation d'eau et la production des volumes importants des déchets de construction et de démolition. Ces facteurs contribuent à l'apparence générale que le béton n'est pas particulièrement respectueux à l'environnement ou conforme avec les exigences du développement durable d'où est venue l'idée du béton vert.

Les analyses de cycle de vie des structures en béton indiquent que, parmi les différents constituants du béton, le ciment représente la source principale des émissions de CO₂ où 95% des émissions de gaz à effet de serre provient du procédé de fabrication du ciment. Donc, il paraît que le ciment est le paramètre clé pour réduire l'impact environnemental du matériau béton.

Plusieurs voies existent déjà pour réduire l'impact environnemental du secteur de la construction. L'une des voies envisagées est l'utilisation des déchets solides ou des sous-produits industriels comme remplacement partiel du ciment dans le béton. C'est une stratégie viable pour réduire l'utilisation du ciment Portland et donc rendre la production de béton écologique et économique en énergie.

En Algérie, le filler calcaire est l'un des ajouts minéraux couramment utilisée dans la production des bétons autoplaçants (BAP). Cependant, la quantité de cet ajout devient insuffisante pour couvrir la demande croissante d'ajouts minéraux ainsi que le manque des ressources naturelles et leur épuisement. Ici, rentre la valeur de l'utilisation des sous-produits industriels (fines recyclées) dans la production des bétons, en appliquant ainsi le principe du développement durable.

Malgré l'existence des grandes quantités des sous-produits industriels tels que le laitier de haut fourneau, les cendres volantes, la fumée de silice, il reste encore d'autres déchets industriels non utilisés, comme les déchets de verre et les déchets de marbre. La revue de

littérature montre qu'il y'a peu d'étude sur l'incorporation de la poudre de marbre, la poudre de verre et le laitier de haute fourneau dans les bétons autoplçants et les quelques études réalisées portent seulement sur la caractérisation classique à l'état frais et durci. Mais des études limitées voire absentes qui portent sur leur comportement à long terme et leur durabilité notamment leur tenue aux cycles gel dégel.

Suivant le type des fines recyclées, les réponses du béton autoplçant en termes de déformations à long terme puissent être très différentes car ces fines engendrent des microstructures plus fines que celle de ciment portland. Ainsi sous dessiccation, les contraintes développées sont différentes, cela peut accentuer ou non le comportement différé et peut conduire à l'apparition de microfissuration dans la microstructure du matériau, ce qui affecte sa durabilité qui constitue aujourd'hui un facteur primordial pour l'élaboration de tout nouveau matériau.

Dans le cadre de cette étude, trois fines recyclées de nature différente ont été utilisées (le laitier granulé, la poudre de verre et la poudre de marbre) comme des substituts totaux des fillers calcaires (l'ajout couramment utilisé et qui risque d'être épuisé). L'approche est essentiellement expérimentale. Elle est basée sur trois axes.

Le premier axe d'évolution concerne l'étude de la faisabilité du remplacement total des fillers calcaires par des fines recyclées locales dans la fabrication des bétons autoplçants avec un objectif de valoriser leur utilisation et d'étudier leur influence sur les propriétés frais et durci des BAPs en fonction de leurs natures.

Le deuxième axe concerne l'influence du remplacement total des fillers calcaires par des fines recyclées locales sur le comportement différée sans charge, retrait, et sous charge, fluage, des bétons autoplçants. A noter la séparation des déformations différées endogènes et de dessiccation.

En fin, le troisième axe, qui s'articule sur l'étude de l'influence de la substitution totale des fillers calcaires par des fines recyclées sur la tenue au gel des bétons autoplçants.

La thèse se compose de deux grandes parties. La première partie à une dominante bibliographique, elle se décompose en deux chapitres :

- Le premier est consacré à des généralités sur les sous-produits ou déchets industriels et leur valorisation en particulier en tant que fines recyclées, suivi du rôle des fines dans les matrices cimentaires et les transformations chimiques, physiques et microstructurales.

- Le deuxième chapitre est destiné à une revue de littérature des travaux antérieurs en mettant l'accent sur la nature des fines recyclées utilisés et leur influence sur le béton autoplaçant dans tous ses états : frais, durcissant et durci.

La deuxième partie est consacrée aux campagnes expérimentales et ses résultats, elle est structurée comme suit :

- Le troisième chapitre décrit en détail tous les matériaux utilisés et regroupe la caractérisation classique des mélanges retenus.
- Le quatrième chapitre s'intéresse à l'étude de l'influence des fines recyclées (en remplacement total des fillers calcaires) sur les comportements différés : retrait libre et fluage flexionnel.
- Le dernier chapitre présente l'étude de durabilité des bétons autoplaçants à base des fines recyclées exposés à des conditions hivernales modérées : cycles gel-dégel.

Enfin, les conclusions générales clôturent cette thèse, en synthétisant non seulement les principaux résultats des performances mécaniques (résistance à la compression – résistance à la traction indirecte – module d'élasticité) des bétons autoplaçants mais aussi l'analyse du comportement différé et de durabilité vis-à-vis l'action des cycles gel-dégel des bétons autoplaçants retenus. Des perspectives de recherche sont aussi présentées pour continuer à apporter de nouvelles informations pertinentes à ces nouveaux matériaux du génie civil.

CHAPITRE I : NOTIONS SUR LES AJOUTS MINÉRAUX DANS LES MATRICES CIMENTAIRES

I.1. INTRODUCTION

La plupart des propriétés du béton, et plusieurs aspects de sa durabilité dépendent des caractéristiques de la pâte de ciment durci. Cela implique nécessairement une compréhension de la structure de la pâte de ciment hydratée.

La prise et le durcissement du ciment se traduit par un ensemble de réactions chimiques d'hydratation permettant le passage d'une pâte de ciment liquide à un matériau mécaniquement résistant. C'est un processus complexe et devient encore plus complexe lors de l'introduction des ajouts minéraux.

L'objectif de ce chapitre est de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur l'action des ajouts dans les matériaux cimentaires afin d'éclaircir en particulier comment elles contribuent à l'activité liante du ciment. Ce chapitre porte, tout d'abord, sur les constituants du ciment leurs caractéristiques chimiques ainsi que leurs évolutions au cours de l'hydratation; ensuite les caractéristiques générales des ajouts minéraux, leurs rôles et réactivités dans les matrices cimentaires. Ce chapitre traitera aussi le mécanisme d'action des ajouts minéraux utilisés dans le cadre de cette étude de façon à mieux comprendre le comportement du béton vis-à-vis de la présence de ces ajouts.

I.2. CIMENT PORTLAND

Le ciment Portland est un produit à base de clinker et de sulfate de calcium (gypse). Le clinker est obtenu à la suite des réactions chimiques qui se produisent à une température d'environ 1450°C et qui convertissent la matière première constituée principalement de calcaire, d'argile et de fer en silicates et en aluminates de calcium.

Les silicates et les aluminates de calcium proviennent de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). Le calcaire (CaCO₃) apporte

essentiellement le CaO, et l'argile comble le manque en oxydes SiO₂, Al₂O₃ tandis que le fer manquant est apporté par le Fe₂O₃ [Mechaymech, 2005].

Le ciment Portland ordinaire est essentiellement composé de quatre phases principales:

- Silicate tricalcique ou « alite » C₃S, dont la formule est 3CaO,SiO₂. On trouvera ce composant dans un ciment Portland à une proportion de 50% à 65%. Le C₃S donne au ciment une résistance rapide et élevée.
- Silicate bicalcique ou « bélite » C₂S, dont la formule est 2CaO,SiO₂. Ce composant à une proportion qui varie de 15% à 20% et il permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et à long terme.
- Aluminate tricalcique C₃A ou « célite », de formule 3CaO,Al₂O₃. Ce composant se trouve dans le ciment portland avec une proportion qui varie entre 5% et 15% et il a un rôle majeur dans la rhéologie de la pâte ainsi que la résistance à court terme du matériau [Bezzi, 2011].
- Alumino-ferrite tétracalcique C₄AF, de formule 4CaO,Al₂O₃,Fe₂O₃. La proportion de ce composant dans un ciment portland varie de 5% à 10% et il a un rôle mineur dans la réaction de durcissement.

En complément de ces composants, le gypse, CaSO₄.2H₂O noté C, sera ensuite ajouté pour la régulation de la prise.

I.3. HYDRATATION DU CIMENT

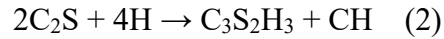
L'hydratation de ciment Portland fait intervenir des réactions chimiques très diverses avec l'eau. Toutes ces réactions conduisent à la formation des silicates ou des aluminates calciques hydratés qui font prise et qui donnent les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires.

Dès la mise en contact de ciment avec l'eau les réactions d'hydratation débutent. Les constituants anhydres du ciment donnent naissance à des silicates, des aluminates de calcium hydratés et de la chaux hydratée « Portlandite », lesquels forment un gel microcristallin à l'origine du phénomène de prise [Benia, 2006].

Les principales réactions d'hydratation sont :

L'hydratation du silicate tricalcique ou bicalcique de calcium (C₃S ou C₂S) est une réaction exothermique conduisant à la formation de silicate de calcium hydraté et d'hydroxyde de calcium. Les réactions d'hydratation peuvent être représentées par les équations (1) et (2) :

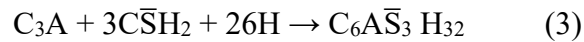




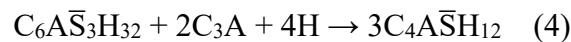
A l'inverse de la composition de l'hydroxyde de calcium (CH ou Portlandite) qui est un composé cristallin bien défini, la composition des silicates de calcium n'est pas bien définie et généralement notée CSH [Roux, 2008].

* Aluminates et Alumino-ferrites de calcium :

Le processus d'hydratation de l'aluminate tricalcique se déroule en deux étapes [Bezzi, 2011]. La première, en présence de sulfate, l'hydratation de C3A engendre la formation d'ettringite, l'équation (3) :



La deuxième étape, quand la teneur en sulfate diminue, l'ettringite réagit avec le reste de C3A pour former du monosulfo-aluminate hydraté, l'équation (4) :



Comme mentionné précédemment, une quantité de gypse est incorporé dans la composition du ciment pour ralentir le phénomène de prise rapide engendré par la vitesse élevée de l'hydratation du C3A.

En fin d'hydratation les principaux composants issus sont :

- Les Silicates de Calcium Hydratés « C-S-H », généralement amorphes dont le ratio Ca/Si varie, mais constitue 60 à 70% d'une pâte de ciment hydratée.
- L'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ « Portlandite », représente 20 à 30% en masse d'une pâte de ciment hydratée.
- Les sulfo-aluminates de calcium « Ettringite » et les monosulfates constituent 5 à 15% d'une pâte de ciment hydratée.

Les proportions citées ci-dessus correspondent aux CEM I, Dans les autres classes de ciments, elles peuvent être très différentes compte tenu des différents ajouts minéraux : Fillers calcaires, laitier, cendres volantes, fumée de silice, . . .

I.4. LES AJOUTS MINÉRAUX

La norme européenne EN 206-1 (NF P 18-325) de février 2002 définit les additions comme « *des matériaux minéraux finement broyés utilisés dans le béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières* » [Bessa-Badreddine, 2004].

Les ajouts minéraux sont généralement des sous-produits minéraux qui peuvent être naturels ou artificiels. Ils sont des poudres très fines de taille inférieure à 80µm. Leur incorporation peut se faire lors de la fabrication de ciment composé ou dans une centrale à béton au moment de la fabrication du béton.

Les ajouts minéraux contiennent les mêmes composants chimiques mais les proportions sont toutefois différentes. Ils sont classés dans un diagramme ternaire $\text{CaCO}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ de Rankin, reporté dans la figure I.1, d'où on remarque que les ajouts minéraux sont repérés dans le diagramme par des zones et non pas par des points, ce qui peut laisser prévoir une variabilité des compositions chimiques pour des ajouts d'une même famille.

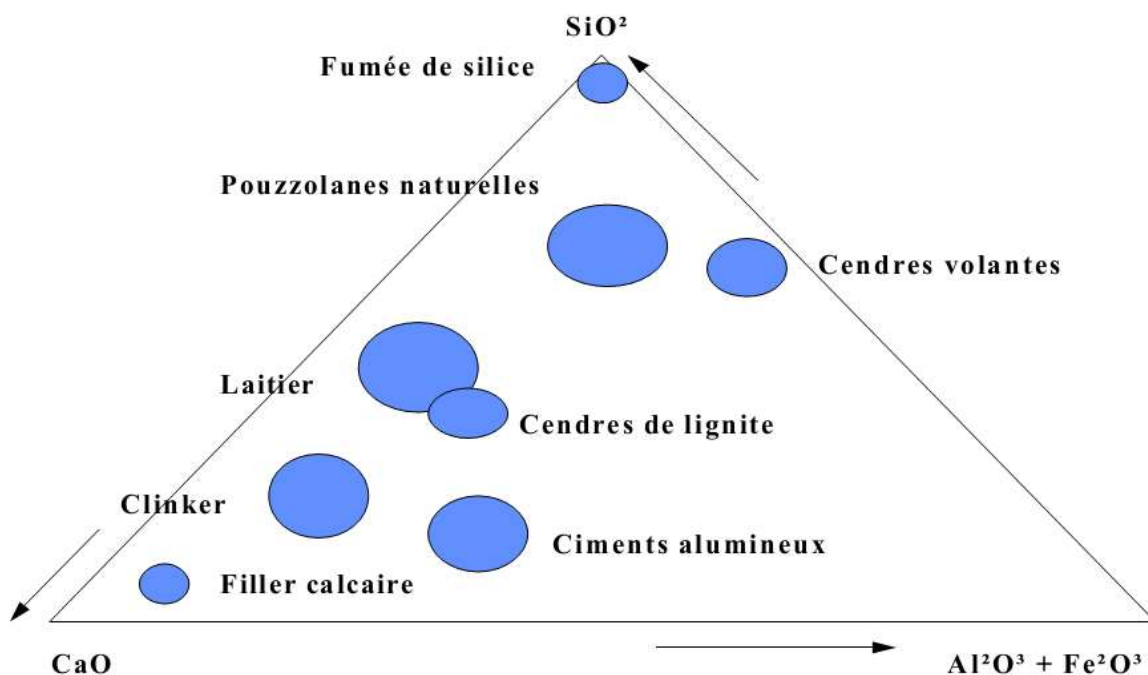


Figure I. 1 : Diagramme de Rankin [Adam, 2014]

I.5. ACTION DES AJOUTS MINÉRAUX SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRES

Les ajouts minéraux entraînent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. Cela est dû à leur finesse et leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment.

La présence des ajouts minéraux modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide. Au cours de la prise et du durcissement, les particules des ajouts interagissent dans le processus d'hydratation du ciment en modifiant

la structure des produits hydratés et pour certaines peuvent réagir chimiquement en milieu cimentaires pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire [Boudchicha, 2007].

Les mécanismes à l'origine de ces modifications semblent être particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes, s'accordent pour distinguer trois principaux effets des ajouts dans un matériau cimentaire [Boudchicha, 2007].

I.5.1. EFFET PHYSIQUE

C'est un effet granulaire, appelé aussi effet filler, qui agit sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais.

La présence des additions finement broyées modifie la structure du squelette granulaire du matériau en comblant les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et en rendant le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau. De plus, leur introduction modifie les frottements entre les composants de la suspension solide dans la phase liquide.

Le rôle propre du superplastifiant est essentiellement la défloculation, grâce à sa propriété dispersante, ce qui engendre des grappes d'ultrafines qui se forment du gâchage et leur permet ainsi de jouer leur rôle granulaire [Chaid et al, 2010].

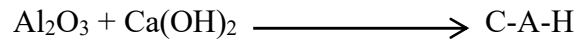
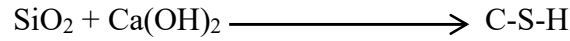
I.5.2. EFFET PHYSICO-CHIMIQUE

c'est un effet microstructural engendré par les multiples interactions entre les particules de l'ajout et le processus d'hydratation du ciment. Au cours de la prise et du durcissement, les particules des ajouts interagissant l'évolution de l'hydratation du ciment et peuvent modifier la structuration des produits hydratés [Bessa-Badreddine, 2004].

I.5.3. EFFET CHIMIQUE

Certaines additions minérales, actives, réagissent avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment pour former de nouveaux produits hydratés CSH, qui présentent un caractère liant, contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau.

L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique [Zeroub, 2012]. Les réactions pouzzolaniques sont les suivantes :



I.6. REACTIVITE DES AJOUTS CIMENTAIRES

Selon leurs activités chimiques avec le ciment portland, les ajouts cimentaires peuvent être classés en trois types : hydraulique latent, pouzzolanique et inerte.

I.6.1. AJOUTS A HYDRAULICITE LATENTE

L'hydraulicité est la capacité d'un matériau à faire prise en présence d'eau, c'est-à-dire que sa composition chimique suffit à former des phases liantes [Frohard, 2014].

Les ajouts hydrauliques latents contiennent moins d'oxyde de calcium (la chaux CaO) que le ciment portland et ne réagissent pas avec l'eau [Benia, 2006]. Mais, dans un milieu alcalin et en présence d'eau, lorsque le ciment Portland forme suffisamment d'hydroxyde de calcium (la portlandite CH), les ajouts à hydraulicité latente riches en chaux réagissent en formant des composés semblables aux hydrates de ciment portland mais en durcissant de manière plus lente que ce dernier [Bezzi, 2011]. Dans cette procédure, l'hydroxyde de calcium intervient en qualité d'activateur et non pas de partenaire réactif [Benia, 2006].

I.6.2. AJOUTS POUZZOLANIQUES

Les ajouts pouzzolaniques sont définis, par la norme américaine ASTM C125-07, comme des matériaux siliceux et alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes des propriétés liantes [ASTM C125, 2007].

Au début de l'hydratation, ces ajouts sont inactifs et retardent plus ou moins la montée en résistance du béton [Bezzi, 2011]. Mais au cours du temps, le composant chimique principal dans les ajouts pouzzolaniques, silice vitreuse réactive (SiO_2), peut réagir lentement avec de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 , issu de l'hydratation du ciment, pour former des composés insolubles, analogues aux hydrates de ciment [Bezzi, 2011].

L'hydroxyde de calcium produit de l'hydratation du ciment Portland n'intervient par conséquent pas uniquement en qualité d'activateur, mais il est nécessaire en tant que réactif puisque qu'il est consommé pour former les phases liantes [Benia, 2006], [Frohard, 2014].

Les contributions des ajouts pouzzolaniques à la résistance varient considérablement avec leur réactivité, qui dépend de leurs propriétés intrinsèques. Un matériau pouzzolanique typique est caractérisé par sa teneur élevée en silice amorphe, qui varie d'un ajout pouzzolanique à l'autre, et par sa grande surface spécifique car les particules fines réagissent plus vite que les particules grossières, ce qui conduit à une plus grande résistance au jeune âge. D'autres facteurs tels que la forme des particules, la teneur en CaO et en Al₂O₃ affectent également la réactivité des ajouts pouzzolaniques.

A des températures normales et en présence d'eau, la réaction entre le ciment et les ajouts pouzzolaniques est généralement lente [Liu, 2009]. Pour accélérer leur réactivité trois méthodes ont été développées:

- Le traitement mécanique en améliorant sa finesse par broyage;
- Une activation chimique par l'addition des produits chimiques;
- Le traitement thermique par le durcissement à température plus élevée et/ou une pression plus élevée.

Parmi les ajouts les plus utilisées citons: la pouzzolane naturelle, la fumée de silice, les cendres volantes et le métakaolin.

I.6.3. AJOUTS INERTES

Les ajouts inertes sont des fillers qui peuvent varier les uns des autres par leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leur finesse, la forme et l'état de surface des grains, ainsi que leur dureté et porosité.

En général, ils n'ont pas une activité pouzzolanique donc ne réagissent pas avec les composants du ciment. Toutefois, un matériau ni hydraulique ni pouzzolanique peut présenter une réactivité modérée vis-à-vis d'autres phases ou d'autres éléments développés au cours de l'hydratation [Frohard, 2014]. L'action des ajouts inertes est principalement physique où leurs particules les plus fines servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats.

Parmi les ajouts inertes les plus utilisés dans la fabrication des bétons autoplaçants, on distingue : les fillers calcaires (FC), la poudre de craie et récemment la poudre de marbre (PM).

Dans ce qui suit, une analyse de la réactivité sera faite pour les ajouts qui font l'objet de cette étude et qui sont : les fillers calcaires, le laitier de haut fourneau, la poudre de verre et la poudre de marbre.

I.7. FILLER CALCAIRE

Le calcaire est le filler le plus fréquemment utilisé en Algérie; il sert aussi bien d'ajout du béton que de constituant du CEM II/A-L (ciment Portland au calcaire).

D'un point de vue minéralogique, le calcaire est une roche qui contient au moins 60% de Calcite ainsi que d'autres composants comme de la dolomie ou du quartz. Il peut également contenir des impuretés telles que l'argile et le graphite mais en dosages généralement faibles. Ces impuretés peuvent influencer les propriétés des fillers et ont un potentiel réactif très important avec les composants du béton [Diederich, 2010].

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium (CaCO_3) mais ils peuvent contenir aussi du magnésium (MgCO_3). La norme NF P 18-508 [NF P 18-508, 2012] définit deux catégories d'additions calcaires, A ou B, selon la teneur en CaCO_3 , valeur de bleu, finesse et granularité. Le Tableau I.1 représente des critères sur les propriétés physiques et chimiques

Tableau I. 1: Critères sur les propriétés physiques et chimiques

Catégories	A	B	Unité
CaCO_3	> 95	≥ 65	%
$\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$	> 95	≥ 90	%
Valeur de bleu de méthylène	< 3	< 10	g/kg
Surface massique Blaine	> 3000	> 2200	cm^2/g
Passant à $63\mu\text{m}$	> 70	> 70	%

Les fillers calcaires des deux catégories peuvent être utilisées en substitution partielle au ciment Portland de type CEM I pour constituer un liant équivalent conformément aux spécifications de la norme NF EN 206-1 [NF EN 206-1]. Le liant équivalent, qui est composé du ciment C et des additions minérales A, peut être déterminé par :

$$L_{eq} = C + kA$$

Avec :

C : le dosage en ciment en kg/m^3 (ciment de type CEM I uniquement).

A : quantité de l'addition en kg/m^3 prise en compte dans le liant équivalent, dont la valeur maximale est définie par le rapport $A/(A+C)$.

k : le coefficient de prise en compte de l'addition, justifié par l'indice d'activité à 28 jours $\geq 0,71$

Les fillers ont un effet qui est principalement physique, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire (Figure I.2). Les particules les plus fines comblent la porosité de la matrice cimentaire dans laquelle ils sont incorporés et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

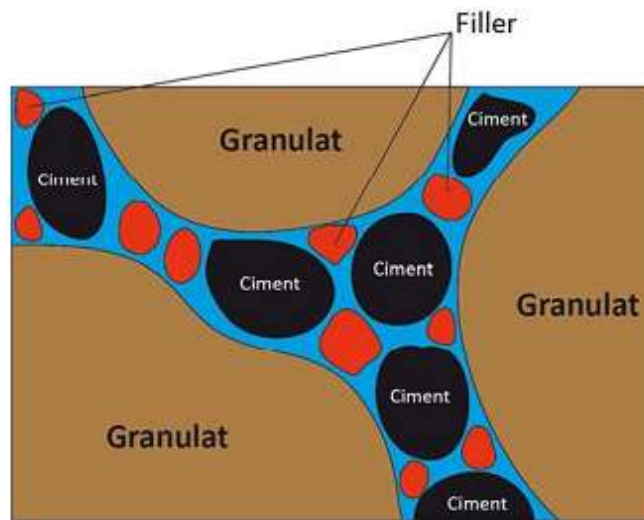


Figure I. 2: illustration de l'effet filler [Diederich, 2010].

De point de vue chimique, les fillers calcaires peuvent posséder certaines réactivités hydrauliques latentes avec le ciment Portland qui contribuent à augmenter les résistances à la compression par la formation des carboaluminates. Mais cette contribution dépend de la quantité de filler et aussi de la quantité de la phase C3A dans le ciment utilisé [Neville, 2000]. En outre, le calcaire finement divisé accélère l'hydratation du ciment plus particulièrement le silicate tricalcique et modifie le rapport Ca/Si des hydrates silicatés (CSH) [Husson, 1991].

I.8. LAITIER A HAUT FOURNEAU

Sous-produits de l'industrie sidérurgique lors de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux, les laitiers sont formés de constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke. Leur composition minéralogique varie énormément en fonction des modes de

refroidissement adoptés. Plus rapide est le refroidissement (la trempe), plus vitreux est le laitier. Selon ces modes on obtient deux formes minéralogiques, le laitier vitrifié et le laitier cristallisé, qui sont fondamentalement différents du point de vue cristallographique et réactivité chimique [Behim, 2005].

Le laitier vitrifié présente une structure vitreuse, obtenue par trempe à l'eau, qui lui confère des propriétés hydrauliques latentes, ce qui permet d'envisager leur utilisation en tant qu'ajout dans les ciments. Au contraire, le laitier cristallisé, obtenu par refroidissement lent à l'air, a une forme minéralogique stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, n'est que modeste [Behim, 2005].

Le laitier vitrifié, appelé laitier granulé, se présente sous forme de petits grains arrondis assez légers, poreux et d'une couleur terne, grisâtre ou jaunâtre. Il a une granulométrie moyenne de 0/4 mm donc il nécessite un broyage pour être utilisé comme ajout minéral.

Le laitier de haut fourneau est un silico-aluminate de calcium et de magnésium, Il est essentiellement constitué des oxydes majeurs CaO, Al₂O₃, SiO₂ et MgO qui représentent 95 à 97% de sa composition totale. Ces oxydes entrent également, en tant que constituants majeurs du clinker.

La composition chimique du laitier peut varier dans de larges limites, suivant la nature du minerai, le type de fonte fabriquée, le combustible utilisé et les conditions de refroidissement. Généralement les concentrations en oxydes varient pour la chaux (CaO) de 35 à 48%, la silice (SiO₂) de 31 à 41%, l'alumine (Al₂O₃) de 9 à 18 %, la magnésie (MgO) de 1 à 9 (%) [Houze, 2013]. Il existe d'autres oxydes en très faibles quantités à savoir le soufre (S), Fe et MnO.

La caractéristique la plus marquante de laitier granulé est sa réactivité hydraulique, c'est-à-dire sa capacité à faire prise en présence d'eau et d'un agent basique (activant). L'hydraulicité du laitier est essentiellement appréciée à partir de trois critères : critères chimiques (indice de basicité), critères minéralogiques (taux de vitrification) et critères granulométriques (la finesse).

La composition chimique de laitier a un rôle important sur leur réactivité, il est globalement admis que les laitiers sont d'autant plus réactifs que leur teneur en CaO et Al₂O₃ est élevée et que celle en SiO₂ est faible. [Divet et al, 2006]. Leur hydraulicité augmente aussi avec la teneur en MgO pour un dosage strictement inférieur à 15 %. Donc la composition chimique est une donnée essentielle pour définir l'hydraulicité des laitiers. Par conséquent, des indices

chimiques ou encore d'activité ont été établis afin d'évaluer ce caractère hydraulique. L'indice le plus connu et le plus répandu est l'indice de basicité « I_b » qui indique si un laitier est basique ou acide. Il correspond au rapport entre la somme des constituants basiques du laitier à la somme de ses constituants acides. Là aussi, il existe plusieurs indices [Behim, 2005], parmi lesquelles nous citons:

$$I_{b1} = \frac{CaO}{SiO_2} \quad , \quad I_{b2} = \frac{CaO + MgO}{SiO_2} \quad , \quad I_{b3} = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

L'indice de basicité ($I_b = CaO/SiO_2$) est le plus couramment utilisé. Suivant cet indice les laitiers peuvent être classés en trois catégories :

$I_b = 1,3$ à $1,4$: les laitiers de basicité élevée

$I_b = 1,1$ à $1,2$: les laitiers de basicité modérée

$I_b < 1$: les laitiers acides.

Selon L. Divet et al [Divet et al, 2006], pour une bonne activité hydraulique, l'indice de basicité doit être proche de 1,3 comme illustré dans la Figure I.3.

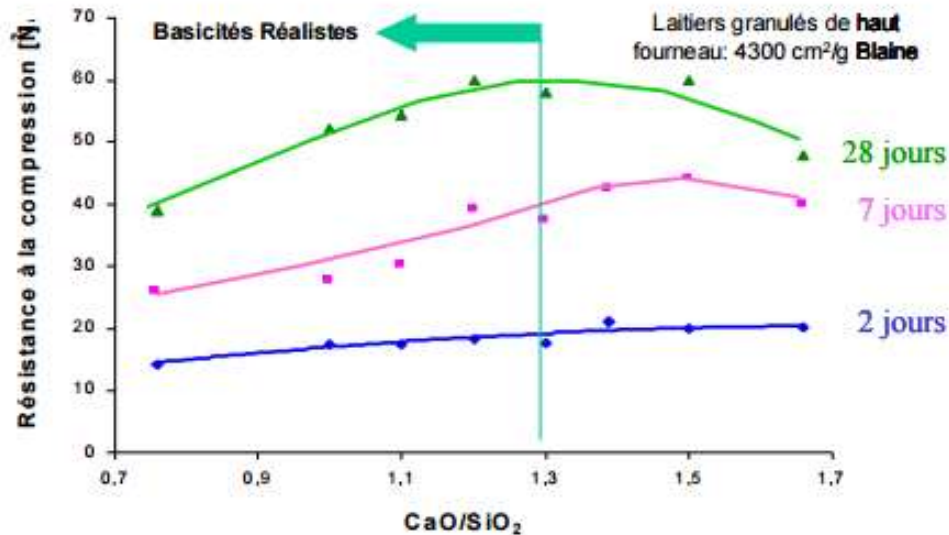


Figure I. 3: Evolution de la résistance à la compression de laitiers granulés de haut fourneau en fonction de l'indice de basicité CaO/SiO_2 [Houze, 2013].

L'activité hydraulique du laitier croît avec l'augmentation de l'indice de basicité et celui d'activité, qui est donné par la formule :

$$I_a = \frac{Al_2O_3}{SiO_2}$$

Pour un indice d'activité : $I_a = 0,33$ à $0,40$: le laitier est acide.

$I_a = 0,17$ à $0,25$: le laitier est basique.

D'autres formules ont été rapportées dans la littérature [Pal et al, 2003], [Zeghichi, 2004], [Behim, 2005], les plus pertinentes sont les suivants :

$$I_a = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \geq 1$$

C'est la formule en vigueur chez certains auteurs allemands depuis 1942.

En France, Langavant a déterminé l'indice de qualité :

$$I = 20 + CaO + Al_2O_3 + 0,5MgO - 2SiO_2$$

Pour un indice :

$I < 12$: on obtient un laitier présentant de faibles propriétés hydrauliques.

$I > 16$: on obtient un laitier représentant de meilleures propriétés hydrauliques.

Ainsi que :

$$I_a = \frac{CaO + 0.56 MgO + 1.4 Al_2O_3}{SiO_2} \geq 1.65$$

$$I_a = \frac{CaO + MgO + 0.66 Al_2O_3}{SiO_2 + 0.33 Al_2O_3} \geq 1$$

L'hydraulicité du laitier, ou sa réactivité hydraulique, dépend également de son taux de vitrification et de sa teneur en verre. Comme mentionné précédemment, seul le laitier suffisamment vitrifié est réactif. La structure vitreuse ainsi que la teneur en verre des laitiers sont en fonction de la température et de la vitesse de granulation [Michel, 2009]. En effet, le laitier à l'état fondu a une énergie thermique très élevée qui n'est pas complètement dissipée

lors d'un refroidissement rapide, contrairement à un refroidissement lent qui donne un laitier cristallisé avec un niveau d'énergie très bas. De ce fait, le laitier vitrifié possède une énergie interne plus élevée qu'à l'état cristallin, ce qui lui attribue la capacité de réagir [Rompaey, 2006]. Une fois broyé il possède des propriétés hydrauliques latentes qui ne peuvent être stimulées que par un activant basique.

Du point de vue granulométrique, la surface spécifique a une influence sur la réactivité hydraulique. La finesse de mouture du laitier granulé agit favorablement sur les résistances mécaniques. Plus le laitier est fin, plus la réactivité hydraulique est élevée car en augmentant la finesse, la surface de contact entre les phases vitreuses du laitier, l'agent activateur et l'eau augmente. Ce qui justifie l'utilisation de laitier granulé finement broyé comme un ajout cimentaire.

I.9. LA POUDRE DE VERRE

Le verre est un matériau solide, homogène non cristallin (amorphe) obtenu par trempe d'un liquide surfondu. Selon la composition principale, le verre peut être classé en plusieurs types, mais le verre sodocalcique est le plus couramment utilisé pour la fabrication des bouteilles, des flacons (verre creux) et des vitrages (verre plat) et par conséquent, il compose la plus grande partie des déchets de verre. La composition typique de verre sodocalcique est d'environ 70% de silice (SiO_2), 13 à 17% de sodium (Na_2O) et 10% de calcium (CaO) [Caijun et al, 2007].

Les principales caractéristiques de ce produit résident dans sa composition chimique, sa finesse, et sa phase amorphe.

En termes de composition minéralogique, le verre est amorphe, donc potentiellement réactive, mais ne présente pas de fraction basique pour être hydraulique [Frohard, 2014]. Selon la norme ASTM C618 [ASTM C618, 2002], un matériau est considéré comme pouzzolanique si sa composition chimique vérifiée $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ et son indice d'activité (i) est supérieur à 75%. Cet indice est déterminé par le rapport entre la résistance en compression d'un mortier à base d'ajout (R_a) et celle d'un mortier témoin sans ajout (R_t).

$$i = 100 \times R_a / R_t$$

L'indice d'activité est un paramètre qui décrit quantitativement le taux de réaction entre un matériau pouzzolanique et la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en présence d'eau pour former du gel de C-

S-H principal responsable du développement des résistances mécaniques [Savadogo et al, 2015].

La pouzzolanité de la poudre de verre est plus liée à la finesse que d'autres facteurs tels que la forme des particules, la composition et la couleur [Byars et al, 2004] cité par [Lui, 2009b]. Plus les grains de verre sont fins, meilleure est son activité pouzzolanique. De plus, des études ont montré que le verre finement broyé ne contribue pas à la réaction alcalin-silice [Khmiri et al, 2012].

Une taille de particules de 75 μm ou moins est rapportée comme étant favorable à l'activité pouzzolanique [Shao et al, 2000]. En outre, Khmiri et al [Khmiri et al, 2012] ont conclu que l'indice de résistance à la compression des poudres de verre finement broyées atteint plus de 82% pour des tailles inférieures à 40 μm . Donc, on générale, on peut dire que l'activité pouzzolanique des poudres de verre peut être améliorée par broyage.

L'activité pouzzolanique varie aussi d'un verre à un autre, selon leur couleurs, le verre brun est le verre qui possède la plus faible activité, par contre le verre vert et le verre blanc présentent une activité pouzzolanique considérable [Zeroub, 2012].

I.10. POUDRE DE MARBRE

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire pur entièrement recristallisé. Sa densité est élevée en moyenne de 2.7. La pureté du marbre est responsable de son apparence et couleur il est blanc si le calcaire est composé uniquement de calcite (100% CaCO_3) [Pathan et al, 2014]. Le marbre est utilisé pour la construction et la décoration. Il est durable, a une apparence noble, et est donc en forte demande.

Actuellement, une grande quantité de poudre est générée pendant le processus de sciage, façonnage et lustration de la pierre de marbre. En conséquence, la masse ce déchet, qui représente presque 20% des pierres utilisées, a atteint des millions de tonnes qui seront rejetés par la suite dans la nature provoquant ainsi des problèmes environnementaux. Parmi les moyens d'exploitation des déchets de marbre est de l'utiliser en tant que filler dans les matériaux cimentaires.

Généralement, la poudre de marbre est se caractérise par un taux assez élevé de calcium (CaO) varie de 38 à 42% associée à de la magnésie et de silice en faibles teneurs.

I.11. CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre était de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur l'action des ajouts minéraux dans les matrices cimentaires afin d'éclaircir en particulier comment elles contribuent à l'activité liante du ciment.

Les ajouts minéraux ont été largement utilisés dans les bétons autoplaçants. Presque tous les bétons autoplaçants incorporant soit un mélange binaire ou ternaire de ciment avec des additions pouzzolaniques pour améliorer les propriétés à l'état frais, contrôler la résistance, réduire l'élévation de température et améliorer les propriétés à l'état durci. Bien que la plupart des propriétés sont dégradées par l'inclusion des additions inertes dans les bétons autoplaçants, leur utilisation reste toujours intéressante due à leur l'impact sur l'environnement.

Dans le chapitre suivant, une synthèse bibliographique a été effectuée pour évaluer les conséquences d'introduction des fines recyclées sur l'évolution des propriétés étudiées dans ce travail (Propriétés mécaniques, retrait libre, fluage et résistance aux cycles gel-dégel) dans le but de faciliter la familiarisation avec les phénomènes retenus dans cette étude.

CHAPITRE II : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1. INTRODUCTION

D'un point de vue général, la recherche fait état d'une variété d'applications possibles des ajouts minéraux dans la construction. Dans le cas d'une valorisation dans les matériaux cimentaires, les fines recyclées peuvent être incorporées dans les bétons en tant qu'ajouts minéraux en substitution du ciment.

Dans ce chapitre, un bilan de l'état des connaissances actuelles sur l'utilisation de certaines fines recyclées dans les matériaux cimentaires, plus particulièrement dans les bétons autoplaçants, a été réalisé. Leurs effets sur les propriétés mécaniques, comportements différés et la durabilité des bétons sont exposés dans les paragraphes suivants. Cette étude se focalise sur les quatre ajouts minéraux présentés au préalable : Les fillers calcaires, le laitier granulé de haut fourneau, la poudre de verre et la poudre de marbre.

II.2. PROPRIETES MECANIQUES

L'introduction d'ajouts minéraux entraîne une modification de la structure poreuse des matrices cimentaires en améliorant ainsi les résistances mécaniques des bétons [Billberg, 2001]. Une amélioration par effet physique, au jeune âge, et par effet pouzzolanique lorsqu'elles sont chimiquement actives, à long terme [Behim, 2005]. Cette amélioration des résistances dépend de plusieurs paramètres : de la nature, de la finesse et du dosage de l'ajout.

Les performances mécaniques des BAPs semblent être beaucoup plus influencées par la présence des fillers calcaires. W. Zhu et al [Zhu et al, 2005] ont montré que la finesse des fillers calcaires conduit à une augmentation significative des résistances à la compression en particulière aux jeunes âges par rapport à un béton ordinaire de même rapport Eau/liant. Confirmant ainsi les résultats de V.B. Bosiljkov [Bosiljkov, 2003]. Cela est dû à la nature physique des fillers calcaires qui régit la résistance à la compression due à la matrice dense et la meilleure dispersion des grains de ciment [Bonavetti et al, 2003]. En outre, les grains de calcaires favorisent la formation de la nucléation hétérogène responsable des produits de réaction précoces CH et CSH, qui accéléreront l'hydratation de clinkers de ciment (en

particulier C3S) et par conséquent augmenter les valeurs de résistance à la compression aux jeunes âges [Sari et al, 1999], [Lawrence et al, 2005].

L'évolution des résistances à la compression est inversement proportionnelles avec le taux de substitution du ciment par des fillers calcaire [Turcry et al, 2005] [Bensebti, 2008]. P. Turcry et al [Turcry et al, 2005] ont trouvé que la résistance à la compression d'un béton diminue avec le taux de substitution du ciment par le filler calcaire. Cela vient principalement de l'augmentation du rapport eau /ciment, étant donné que le volume de la pâte et le dosage en eau restent constants.

Selon B. Topcu [Topcu et al, 2009], les propriétés mécaniques des bétons autoplçants augmente, en augmentant la quantité de la poudre de marbre avec un dosage optimal de 200 kg/m³. M. Uysal et al [Uysal et al, 2011a] ont étudié l'influence du remplacement partiel du ciment par différentes additions minérales, à savoir les fillers calcaires (LP), la poudre de basalte (BP) et la poudre de marbre (MP) à différents âges. Ils ont rapporté que l'augmentation de la teneur en poudre de marbre mène à une diminution des résistances en compression des BAPs. D'autre part, ils ont constaté que les BAPs à base de poudre de marbre présentent une grande résistance à cause de sa finesse réduite par rapport aux autres additions utilisées (figure II.1).

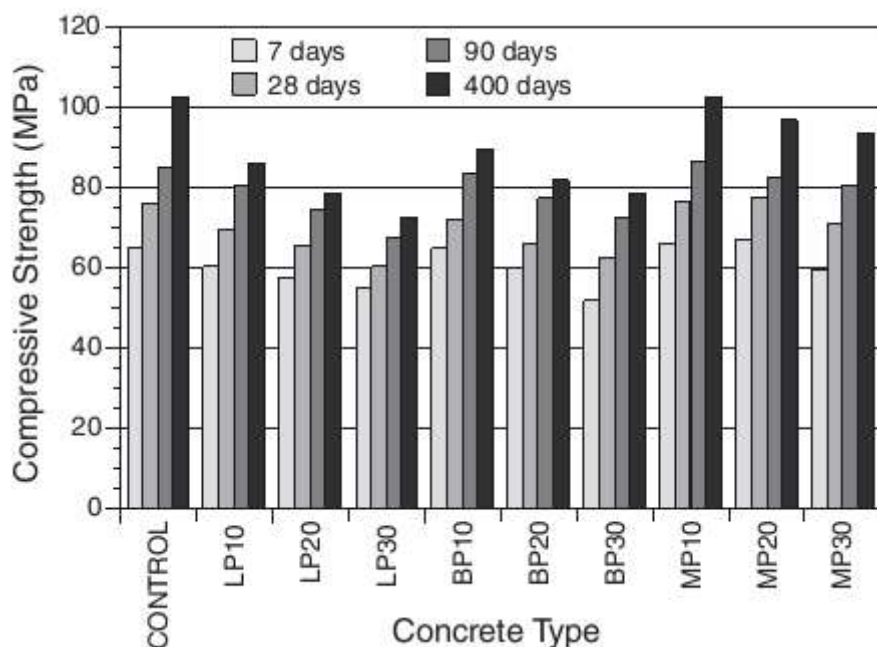


Figure II. 1: Résistance mécanique des bétons autoplçants avec différentes additions (fillers calcaires, poudre de marbre, poudre de basalte) [Uysal et al, 2011a]

Les résultats A. Boukhelkhal [Boukhelkhal, 2012] confirment ceux de M. Uysal et al [Uysal et al, 2011a] car il a constaté que l'incorporation de la poudre de marbre dans les BAPs conduit à une diminution des résistances mécaniques, vitesse de propagation d'onde et la densité. Selon R. Chaid et al [Chaid et al, 2011], le remplacement partiel du ciment par la poudre de marbre ne contribue pas à former un volume important de nouveaux produits hydratés capables de réduire la porosité des bétons même si la résistance en compression peut être plus ou moins améliorée.

P. Neelam et al [Neelam et al, 2012] ont utilisé dans un programme expérimental quatre matériaux cimentaires supplémentaires : deux cendres volantes et deux laitiers. Ils ont trouvé que le développement de la résistance à la compression au bout de 28 jours est inférieur que celui du mélange témoin. Cette tendance est attendue de par sa réaction pouzzolanique lente. Idées confirmé par V. Corinaldesi et al [Corinaldesi et al, 2011]. La différence dans la résistance dépend du type de mélange et de la quantité de CaO.

O. Boukendakdji et al [Boukendakdji et al, 2012] ont constaté que la résistance en compression des BAPs diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier au jeune âge, mais à long terme (56 et 90 jours), la résistance est comparable à celle du béton de référence (Figure II.2).

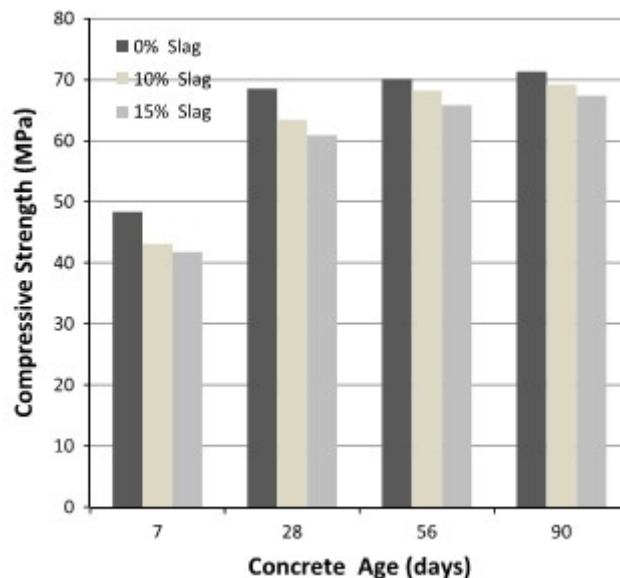


Figure II. 2: L'évolution de la résistance en fonction de l'âge d'un BAP réalisé avec différents dosages de laitier [Boukendakdji, 2012].

E. Vejmelkova et al [Vejmelkova et al, 2011] ont constaté que la résistance à la compression des BAPs à base de laitier granulé augmente de façon significative, même après 28 jours de

durcissement qui était une conséquence apparente de la réaction pouzzolanique. De plus, K. Ayed et al [Ayed et al, 2012] ont noté que les résistances mécaniques en compression des BAPs sont supérieures en présence de pouzzolanes naturelles et fines siliceuses que les fillers calcaires.

L'utilisation des déchets de verre broyés dans le béton comme remplacement partiel du ciment représente une étape importante vers le développement d'un éco-béton durable. En fait, quelques études ont étudié avec succès l'utilisation potentielle de déchets de verre finement broyés comme un matériau pouzzolanique en mettant l'accent sur l'évolution des résistances et de la réactivité alcali-silice. H. Wang et al [Wang et al, 2004], ont conclu que la finesse de la poudre de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique, plus les grains de verre sont fins meilleure est son activité pouzzolanique. Résultat confirmé par A. Khmiri et al [Khmiri et al, 2012] où ils ont conclu que la meilleure activité pouzzolanique est observée en utilisant une poudre de verre ayant une fraction plus fine ($<40\mu\text{m}$), en particulier dans le cas du poudre de verre de couleur verte. N. Schwarz et al [Schwarz et al, 2008] ont constaté que la poudre de verre a une pouzzolanité similaire, voire supérieure à celle des cendres volantes. De ce fait, cet ajout alternatif contribue aux gains de résistances mécaniques et de durabilité dans le temps.

M. Behim et al [Behim et al. 2009] ont constaté que les BAPs contenant de la poudre de verre donnent de meilleures résistances que le BAP de référence à 7 jours, pour un dosage optimal de 45 % environ. Par contre, M.B. Vanjare et al [Vanjare et al, 2012] ont indiqué une diminution de résistance à la compression pour les BAPs contenant de la poudre de verre par rapport au BAP de référence. La réduction moyenne de la résistance à la compression était d'environ 6%, 15% et 20% pour des teneurs en poudre de verre de 5%, 10% et 15% respectivement. En outre, ils ont également trouvé que la résistance à la flexion des BAPs diminue avec l'augmentation de la teneur en poudre de verre. Mais, le taux de diminution est beaucoup plus faible que celui de la résistance à la compression comme illustre la figure II.3. Les mêmes résultats ont été obtenus par [Shakhmenko et al, 2010], [Lui, 2011], [Zerboub, 2012].

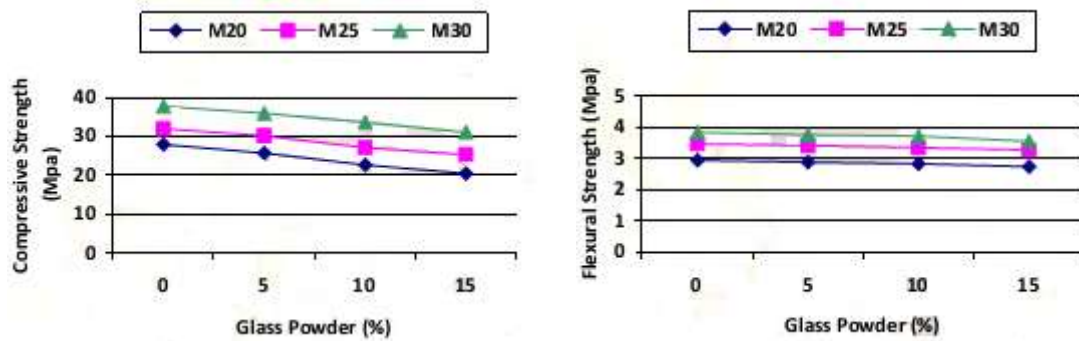


Figure II. 3: L'évolution de la résistance à la compression et à la flexion des BAPs en fonction de la teneur en poudre de verre [Vanjare et al, 2012].

Selon S. Chekireb [Chekireb, 2015], les résistances aux jeunes âges diminuent avec le taux d'incorporation de la poudre de verre (PV). Cependant, il y a un gain de résistance à la compression très significatif à partir de 56 jours de murissement avec le taux d'incorporation de la PV. Résultats qui se traduisent par la nette augmentation de la résistance à la traction par fendage et le module d'élasticité à 91 jours des BAPs binaires et ternaires. A. Khmiri et al [Khmiri et al, 2012] ont indiqué que l'hydroxyde de calcium réagit avec la poudre de verre finement broyée par hydrolyse alcaline pour donner le silicate de calcium hydraté contribuant ainsi à l'amélioration des résistances.

II.3. RETRAIT

Les informations contenues dans la littérature sur l'influence des additions minérales sur le retrait sont jugées un peu contradictoires [Güneyisi et al, 2010] [Loser et al, 2009] [Gesoglu et al, 2009], [Neville, 1995] [Brooks, 1999] [Vikan et al, 2010]. Selon M. Gesoglu et al [Gesoglu et al, 2004] le béton contenant une grande quantité de matériaux cimentaires a une structure poreuse plus fine qui peut augmenter proportionnellement le retrait libre.

Dans leur étude K. Ayed et al [Ayed et al, 2012] ont évalué les comportements différés de trois bétons autoplaçants de même formulation et ne différant que par la nature des additions minérales (pouzzolanes naturelles, fines siliceuses et fillers calcaires). Ils ont constaté que les évolutions de retrait total sont sensiblement équivalentes, quel que soit le type d'additions.

Turcry [Turcry, 2005] et B.K. Van et al (cité par [Assié, 2004]) ont cité que l'emploi des fillers calcaires peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates.

Plusieurs chercheurs [Maslehuddin et al, 1987], [Hammer et al, 2001], [Rozière et al, 2005], [Sahmaran et al, 2007], [Hammer et al, 2007], [Khatib, 2008], [Sahmaran et al, 2009] ont déclaré que l'incorporation des additions minérales telles que des cendres volantes peut réduire à la fois le retrait endogène et de dessiccation en comparaison avec les bétons autoplaçants sans cendres volantes. Selon, M. Sahmaran et al. [Sahmaran et al, 2009], le mécanisme qui peut contribuer à la réduction de retrait de dessiccation dans les BAPs est la densification de la matrice dû à l'ajout des cendres volantes, ce qui peut empêcher l'évaporation de l'humidité interne. De plus, J.M. Khatib [JKhatib, 2008] a conclu qu'il y avait une réduction systématique de retrait de dessiccation lorsque la teneur en cendres volantes augmente et à un taux de substitution de 80% en cendres volantes, le retrait à 56 jours réduit de deux tiers par rapport au BAP témoin. D'autre part, N. Bouzoubaa et al [Bouzoubaa et al, 2001] ont étudié l'influence des volumes élevées des cendres volantes classe F sur le retrait de dessiccation des bétons autoplaçants. Ils ont constaté qu'il n'y a aucune différence entre le retrait de dessiccation des bétons autoplaçants avec des cendres volantes et le béton témoin avec ciment portland sans cendres volantes. En outre, H. Vikan et al [Vikan et al, 2010] ont conclu que le remplacement de ciment à la fois avec des cendres volantes et des fillers calcaires n'a aucune influence sur le retrait, même si le taux de remplacement est augmenté de 20 à 35%. Ces résultats sont en cohérence avec ceux de [Neville, 1995] [Brooks, 1999] où ils ont signalé que les cendres volantes augmentent le retrait de dessiccation ou n'ont pas d'influence du tout.

L'addition de fumée de silice est rapportée à accroître le retrait [Jensen et al, 1996] [Rao et al, 2001]. M. Gesoğlu et al [Gesoğlu et al, 2009] ont rapporté que la fumée de silice augmente le retrait de dessiccation des bétons autoplaçants en particulier lorsqu'elle est utilisée avec un taux de remplacement de 10% et 15%.

L'effet bénéfique de l'incorporation de métakaolin dans les bétons autoplaçants a été rapporté dans plusieurs études [Brooks et al, 2001b],[Güneyisi et al, 2008], [Güneyisi et al, 2012]. A titre d'exemple, E. Güneyisi et al. [Güneyisi et al, 2008] ont étudié l'influence de métakaolin sur la résistance, le retrait de séchage, et la structure poreux du béton. Ils ont déclaré que l'inclusion de MK réduite significativement le retrait de séchage, toute en augmentant les résistances. En outre, A.A. Hassan et al [Hassan et al, 2012] ont remarqué que le retrait de séchage des bétons autoplaçants diminue avec l'augmentation du taux de substitution de ciment par le métakaolin, avec un minimum de retrait à un taux de 20%. Par ailleurs, Il a

également été rapporté dans l'étude de J.J. Brooks et al [Brooks et al, 2001b] que l'utilisation de MK réduit le retrait total d'environ 50%.

D'après leurs études R. Loser et al [Loser et al, 2009], M. Gesoğlu et al [Gesoğlu et al, 2009] ont déclaré que le remplacement du ciment avec du laitier de haut fourneau da haut fourneau conduit à une réduction du retrait, tandis que d'autres auteurs [Song et al, 2001] ont constaté que le retrait peut être augmenté en augmentant la teneur de laitier. En outre, E. Güneyisi et al [Güneyisi et al, 2010] ont étudié les effets de l'utilisation des mélanges binaires, ternaires et quaternaires de ciment Portland, de cendres volantes (CV), le laitier de haut fourneau (LG), la fumée de silice (FS), et le métakaolin (MK) sur la résistance en compression et en particulier le retrait de dessiccation des bétons autoplaçants. Ils ont noté que retrait de dessiccation diminué avec l'utilisation de CV, LG, et MK tandis que l'incorporation de FS a augmenté le retrait de dessiccation (Figure II.4). L'effet bénéfique des cendres volantes ou du laitier granulé de haut fourneau semble être plus prononcé avec l'augmentation du taux de substitution du ciment. Les mêmes constatations ont été trouvées par M. Gesoğlu et al [Gesoğlu et al, 2009].

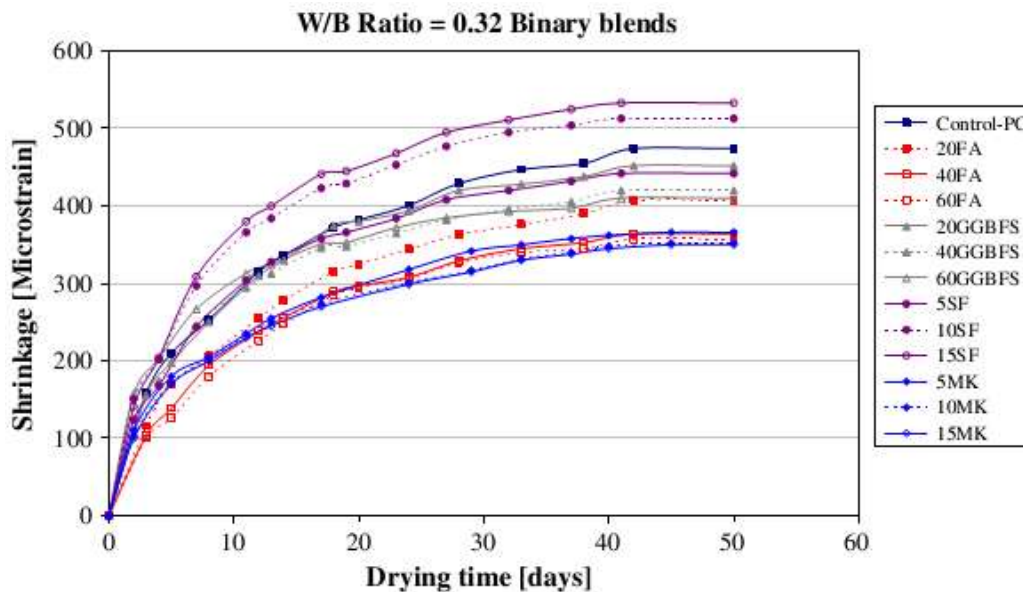


Figure II. 4: L'évolution de retrait pour des BAPs avec différentes combinaisons de fines [Güneyisi et al, 2010]

Cependant, Mokarema et al. [Mokarema et al, 2005] ont déclaré que des bétons contenant des additions minérales présentent un retrait de dessiccation plus grand que celui de béton à base de ciment Portland. Cela pourrait être dû à la matrice plus dense produite par les cendres volantes, microsilica et ciment de laitier. Cette matrice dense créerait des petites cavités

capillaires, et la majeure partie de retrait de dessiccation se produit dans le béton à partir de la perte d'eau à partir des plus petites cavités capillaires.

Concernant l'effet de la poudre de verre, H. Zerboub [Zerboub, 2012] a signalé qu'à l'encontre des autres ajouts cimentaires, l'ajout de la poudre de verre ne réduit pas le retrait dans le béton. Contrairement à l'étude de S. Chekireb [Chekireb, 2015] où elle a montré que la poudre de verre diminue le retrait de séchage des bétons autoplaçants binaires et ternaires. Confirmant ainsi les résultats d'A. Shayan et al [Shayan et al, 2006].

Pour ce qui du retrait endogène, plusieurs auteurs P. Turcry [Turcry, 2004], B. Craeye et al. [Craeye et al, 2010] ont constaté que le type des fillers calcaires n'a aucune influence significative sur le retrait endogène du béton autoplaçant. Par contre, sa finesse semble avoir un impact. Selon O. Esping [Esping, 2008], les fillers calcaires avec une grande surface spécifique (plus fine) provoquent une augmentation de retrait endogène et une diminution de l'évaporation d'eau. M. Valcuende et al [Valcuende et al, 2012] ont montré que l'augmentation du taux de substitution du ciment par du filler calcaire dans les BAPs permet de réduire le retrait endogène. Ceci est probablement dû à une combinaison de plusieurs facteurs tels que l'utilisation des fillers calcaires comme addition, la structure poreuse fine, qui ralentit la diffusion de l'eau au sien de l'échantillon, et la plus grande quantité d'eau absorbée à partir des granulats, ce qui compense l'auto-dessiccation du béton.

Dans son étude, P. Turcry [Turcry, 2004] a constaté que la fissurabilité diminue lorsque le ciment est partiellement remplacé par les fillers calcaires due à la diminution du retrait endogène. De plus, B. Boukni et al [Boukni et al, 2010] ont indiqué que les fillers calcaires ont une influence bénéfique sur le retrait des bétons autoplaçants mais ils n'ont aucun effet significatif sur la perte en poids. Les BAPs contenant un dosage de fillers élevé, avec un dosage $F/L = 0.33$ subit un retrait inférieur, moins de trois fois que celui de BAP contenant moins de fillers, dosage F/L égale à 0.16 [Boukni et al, 2010]. K. Ayed et al [Ayed et al, 2009] ont constaté que le retrait endogène du BAP à base de la pouzzolane naturelle est du même ordre que celui à base des fillers calcaires, au jeune âge. A long terme, l'hydratation lente de la pouzzolane naturelle induit un retrait plus important en raison d'un volume de CSH progressivement plus important.

Cette synthèse bibliographique relativement restreinte à l'égard de l'effet des ajouts minéraux sur le retrait hydrique des bétons autoplaçants indique qu'il y a une absence de recherche concernant l'effet de la poudre de marbre sur le retrait endogène et de dessiccation des bétons

autoplaçants. Ainsi, une contradiction a été rapportée concernant l'effet de la poudre de verre. Ce qui conduit à étudier le comportement différé sans charge des bétons autoplaçants contenant ces deux fines recyclées de nature différente. C'est l'un des axes de cette étude.

II.4. LE FLUAGE

Dans la littérature, il n'existe aucun consensus concernant le rôle des ajouts minéraux sur le fluage du béton. A.M. Neville [Neville, 1995] affirme que leur influence sur le fluage n'est pas claire, puisque des résultats contradictoires peuvent être trouvés dans la littérature.

Concernant l'effet des cendres volantes, elles sont rapportées à accroître considérablement les déformations de fluage en tension [Pane et al, 2002]. Quant au fluage en compression, R.P. Khatri et al [Khatri et al, 1995] ont affirmé que l'inclusion de cendres volantes en béton haute performance a entraîné une diminution des résistances au jeune âge et une élévation des résultats de fluage et de retrait. Par contre, R. Loser et al [Loser et al, 2009] ont constaté que la substitution du ciment avec les cendres volantes semblent de le diminuer légèrement le fluage en compression des bétons autoplaçants.

H. Song et al (cité par [Bermejo et al, 2010]) ont affirmé que la finesse du laitier de haut fourneau affecte le fluage aux jeunes âges des BAPs. Quant aux L. Jianyong et al [Jianyong et al, 2001], ils ont signalé que les déformations de fluage sont considérablement réduites avec l'incorporation de fumée de silice et de laitier de haut fourneau due à leur effet physique. Ces deux additions peuvent remplir les petits pores et les raffiner. Ce raffinement des pores peut être la cause de la perte d'eau réduite, et diminue ainsi la déformation due au fluage. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de [Al-Khaja, 1994], [Khatri et al, 1995] [Heirman et al, 2008]. [Loser et al, 2009].

En outre, Kavanaugh [Kavanaugh et al, 2008] a conclu que, à des résistances similaires, les BAPs à base de laitier de haut fourneau ont subi un fluage inférieur que ceux à base des cendres volantes, indépendamment de l'âge lors du chargement comme illustre la figure II.5.

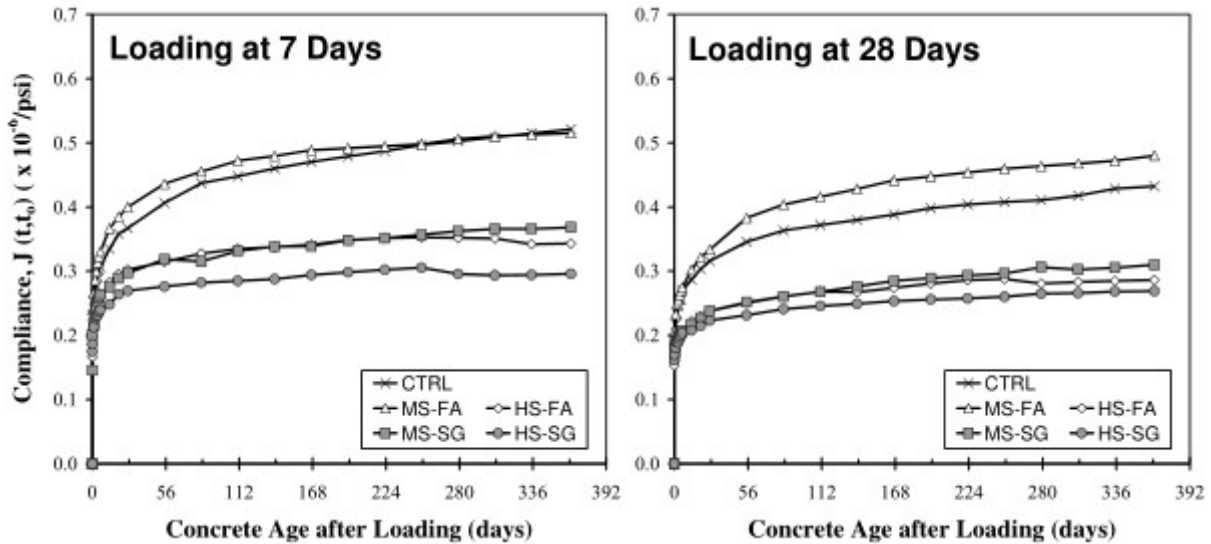


Figure II. 5: L'évolution de fluage pour des BAPs [Kavanaugh et al, 2008]

Selon K. Ayed et al [Ayed et al, 2012], le comportement différé sous charge en mode de dessiccation des BAPs est fortement conditionné par le type d'additions, avec des amplitudes très élevées en présence de pouzzolane naturelle et des fillers calcaires contrairement aux fines siliceuses où les déformations différées restent faibles. Confirmant ainsi les résultats de R. Loser et al [Loser et al, 2009], qu'ils ont constaté que la substitution du ciment avec les fillers calcaires peut augmenter le fluage en compression.

Selon l'étude établie par G. Benkechkeche et al [Benkechkeche et al, 2009], l'ajout des fillers calcaires dans les BAPs augmente légèrement le fluage en flexion quatre points avec un taux de chargement de 25% de la charge de rupture à 7 jours.

Cette synthèse bibliographique relativement restreinte indique qu'il y a une absence de recherche concernant l'effet de la poudre de marbre et la poudre de verre sur le fluage endogène et de dessiccation des bétons autoplaçants. Remarquons au passage que les essais qui ont permis l'étude du fluage de ces bétons étaient principalement des essais de laboratoires sous sollicitation de compression. Les mesures des déformations différées sous sollicitation de tension et flexion sont rares. Pour cela, un des objectifs de ce travail, est d'étudier le comportement au fluage sous sollicitation de flexion quatre points des bétons autoplaçants à base des fines recyclées.

II.5. RESISTANCE AUX CYCLES GEL-DEGEL

Les travaux traitant la tenue au gel des BAPs sont peu nombreux. Les quelques résultats trouvés dans la littérature sont contradictoires et plus particulièrement lorsque différents types

de BAP sont comparés entre eux. Il convient de tenir compte que les BAPs ont des teneurs plus élevées en pâte, qui ont en général un effet négatif sur le comportement au gel-dégel [Müller et al 2012].

L'utilisation des additions minérales peut fournir un moyen d'améliorer la durabilité des bétons autoplaçants en fonction de leur type et quantité [Selvamony et al 2010]. Pour les bétons autoplaçants contenant des cendres volantes, une résistance au gel-dégel équivalente ou même supérieure a été observée par H. Yazici [Yazici, 2008] et E. Mňahončáková et al, [Mňahončáková et al, 2008]. Confirmant ainsi les résultats de Xie et al [Xie et al, 2002], dans lequel la perte de résistance à la compression après 100 cycles de gel-dégel était de 11% et la perte de masse était nulle. Cependant, les bétons autoplaçants contenant les fillers calcaires ont montré une augmentation de l'altération lors de l'essai de gel-dégel [Mňahončáková et al, 2008], [Grzeszczyk et al, 2009]. La mauvaise résistance de ce dernier a été attribuée à la présence d'une famille de pores capillaires absente dans le premier cas car d'après les observations de la microstructure des échantillons, ils ont conclu que la diminution de la résistance du béton autoplaçant avec les fillers calcaires est la conséquence de la porosité capillaire plus élevée et la présence de gros cristaux de phases hydratées. Selon S. Chekireb [Chekireb, 2015] la poudre de verre confère une bonne résistance au gel-dégel et à l'écaillage.

E. Vejmelková et al [Vejmelková et al, 2011] ont constaté qu'un béton autoplaçant à base de métakaolin présente une excellente résistance aux cycles gel-dégel et aucune perte de masse n'a été observée après 56 cycles. Quant au béton autoplaçant contenant de laitier, ils ont observé une bonne résistance au gel-dégel avec une perte de masse de l'ordre de 0,396 kg/m². Ils ont attribué le comportement de ce dernier à la présence des pores dans l'intervalle de 10 à 100 µm qui permet la pénétration de la solution saline plus profondément sous la surface du matériau. En outre, il convient de tenir compte que les BAPs ont des teneurs plus élevées en pâte, qui ont en général un effet négatif sur le comportement au gel-dégel [Müller et al, 2012].

Ce résumé relativement restreint du travail accompli à l'égard de la durabilité des BAPs vis-à-vis l'action du gel-dégel souligne qu'il existe plusieurs types de BAP selon le type de l'ajout minéral utilisé ce qui affecte les propriétés du béton, y compris la durabilité. De plus, peu d'études, voire absentes, ont été réalisées sur la tenue au gel-dégel des bétons autoplaçants à base de laitier de haut fourneau, la poudre de verre et la poudre de marbre. Ce qui conduit à l'un des objectifs de cette étude qui est l'évaluation de l'effet de ces fines sur la résistance aux cycles gel dégel des bétons autoplaçants.

II.6. CONCLUSION

L'utilisation des bétons autoplçants revêt un intérêt particulier sous l'éclairage du développement durable. En effet leur formulation spécifique conduit à un volume de pâte plus important que pour des bétons traditionnels et donc a priori, a une plus grande quantité de ciment ce qui induit un surcoût sur le plan économique et des risques de fissuration thermique, sur le plan technique.

Sur le plan environnemental, le ciment est le constituant responsable de la majeure partie des émissions de gaz à effets de serre liées à la production du béton. La production d'une tonne de ciment génère environ une tonne de CO₂ dues à la cuisson des matières premières pour obtenir le clinker et, partant, ces émissions sont irréductibles. Donc, il est nécessaire de limiter la teneur en ciment dans les bétons autoplçants.

Plusieurs voies existent déjà pour réduire l'impact environnemental du secteur de la construction. L'une des voies envisagées est l'utilisation de déchets solides ou de sous-produits industriels comme remplacement partiel du ciment dans le béton. C'est une stratégie viable pour réduire l'utilisation du ciment Portland et donc rendre la production de béton écologique et économique en énergie.

En Algérie, du fait de leur prix modère, les fillers calcaires sont majoritairement utilisées dans la production des bétons autoplçants (BAP). Cependant, la quantité de cet ajout devient insuffisante pour couvrir la demande croissante d'ajouts minéraux ainsi que le manque des ressources naturelles et leur épuisement. Ici, rentre la valeur de l'utilisation des fines recyclées dans la production des bétons, en appliquant ainsi le principe du développement durable.

Actuellement, la poudre de marbre, qui est un matériau inerte obtenu comme sous-produit industriel au cours du sciage, façonnage et polissage du marbre, est l'un des problèmes écologiques partout dans le monde. 147 569 tonnes de poudre de marbre sont produites par an et déposés sous forme des déchets en Algérie [DGM, 2010]. En effet, leur exploitation en tant que filler dans les bétons autoplçants pourrait être une voie de valorisation intéressante susceptible d'en consommer des grandes quantités.

D'autre part, le déchet verre un autre matériau en abondance. Il a été rapporté que le recyclage de chaque tonne de verre économise plus d'une tonne de ressources naturelles, et le recyclage de chaque six tonnes de verre d'emballage entraîne la réduction d'une tonne d'émission de CO₂. Donc l'utilisation des déchets de verre broyés dans le béton comme remplacement partiel du ciment représente une étape importante vers le développement d'un éco-béton

durable. L'analyse bibliographique montre qu'il y'a peu d'étude traitant l'effet de l'incorporation de ces fines recyclées dans les bétons autoplacants et les quelques études réalisées portent seulement sur leur réactivité et leur effets sur les propriétés classiques à l'état frais et durci. Mais des études limitées voire absentes qui portent sur leur comportement à long terme et leur durabilité notamment leur tenue aux cycles gel dégel.

Suivant le type des fines recyclées, les réponses du béton autoplacant en termes de déformations à long terme puissent être très différentes car ces fines engendrent des microstructures plus fines que celle de ciment portland. Ainsi sous dessiccation, les contraintes développées sont différentes, cela peut accentuer ou non le comportement différé et peut conduire à l'apparition de microfissuration dans la microstructure du matériau, ce qui affecte sa durabilité sous l'action du gel dégel.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence du remplacement total des fillers calcaires par des fines recyclées sur le comportement différé et la durabilité des BAPs ce qui nécessite sans doute de prendre en compte tous les paramètres susceptibles d'influer son comportement. Or, cela nécessite un très grand nombre d'essais qu'il est impossible d'étudier tous à la fois, de ce fait on va se limiter aux paramètres d'étude importants à savoir la nature des fines recyclées et le rapport F/L.

Dans le cadre de cette étude trois fines recyclées de nature différente seront utilisées à savoir le laitier granulé (ajout hydraulique latent), la poudre de verre (ajout pouzzolanique) et la poudre de marbre (ajout inerte) comme des substituts totaux des fillers calcaires (l'ajout couramment utilisé et qui risque d'être épuisé). La démarche adoptée est essentiellement expérimentale. Elle est basée sur trois axes.

Le premier axe d'évolution concerne l'étude de la faisabilité du remplacement total des fillers calcaires par des fines recyclées locales, très abondantes, dans la fabrication des bétons autoplacants avec un objectif de valoriser leur utilisation et d'étudier leur influence sur les propriétés frais et durci des BAPs en fonction de leurs natures.

Le deuxième axe concerne l'influence du remplacement total des fillers calcaires par des fines recyclées locales sur le retrait libre et le fluage flexionnel des bétons autoplacants.

En fin, le troisième axe, qui s'articule sur l'étude de l'influence de la substitution totale des fillers calcaires par des fines recyclées sur la résistance aux gel-dégel des bétons autoplacants.

CHAPITRE III : ELABORATION ET CARACTERISATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS A BASE DES FINES RECYCLEES RETENUES.

III.1. INTRODUCTION

Ce chapitre représente le premier axe de l'étude et a pour but d'étudier la faisabilité du remplacement total des fillers calcaires par des fines recyclées locales dans la production des bétons autoplaçants.

Tout d'abord, il décrit en détail tous les composants anhydres utilisés puis la méthode de formulation adoptée et enfin les essais et les résultats de la caractérisation classique des mélanges retenus.

Tous les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur béton. Les premiers concernent l'étude des propriétés des mélanges à l'état frais afin d'évaluer leur fluidité et leur ségrégation dynamique et statique (essais d'étalement au cône, de la boîte en L, V-funnel et de stabilité au tamis). Ensuite, divers essais relatifs aux domaines mécaniques ont été réalisés sur les mêmes mélanges à des échéances précises (performances mécaniques, module d'élasticité).

III.2. MATERIAUX DE BASE UTILISES

Cette partie s'intéresse à la localisation, l'identification et la caractérisation des matériaux anhydres rentrant dans la confection des BAPs qui ont été testés au cours de cette étude.

III.2.1. GRANULATS

Les granulats sont d'origine naturelle concassés calcaires proviennent de la carrière de Ain Smara. De cette carrière, trois classes granulaires ont été délivrées sous les appellations commerciales suivantes : Sable 0/3, Gravillon 3/8 et 8/15.

➤ CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES GRANULATS

L'analyse granulométrique, réalisé conformément à la norme NF EN 933-1, permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon.

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

Les résultats de l'essai effectué pour les granulats utilisés sont représentés dans la figure III.1.

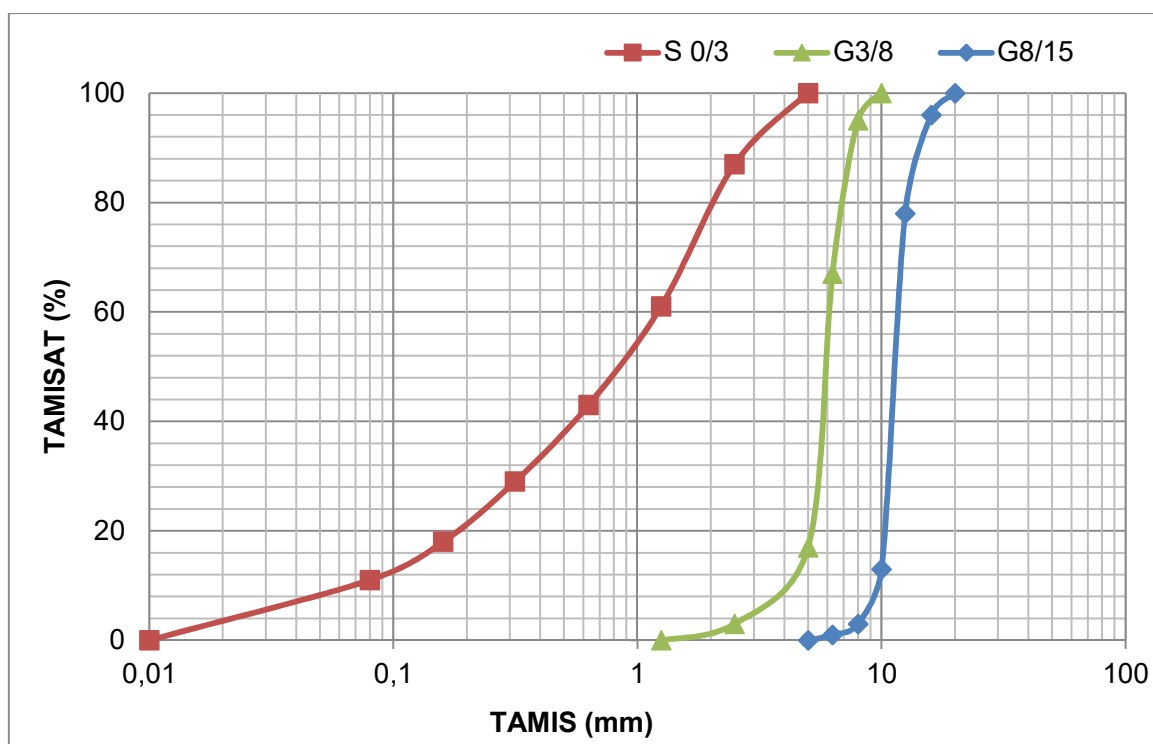


Figure III. 1: Caractéristiques géométriques par voie sèche des granulats utilisés.

L'analyse granulométrique par tamisage représentée à la figure III.1 révèle que la répartition des gravillons est serrée. Elle est, par contre, plus étalée pour le sable. On remarque que le sable utilisé est moyennement fin puisqu'il est composé de 26% de particules de tailles < 0.25mm, de 23% de particules de tailles compris entre 0.25 et 0.8mm. Le module de finesse de sable naturel utilisé est de 2.62 ce qui est acceptable pour la confection des bétons.

➤ **CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES GRANULATS**

Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés sont regroupés dans le tableau III.1.

Tableau III. 1: Caractéristiques physiques des granulats utilisés.

	Propriétés mesurées	Désignation			Norme de spécifications	Références
		0/3	3/8	8/15		
Caractéristiques physiques	Masse volumique absolue (kg/m ³)	2750	2560	2620	/	NF P 18-555
	Masse volumique apparentes (kg/m ³)	1460	1330	1370	/	NF P 18-554
	Equivalent de sable (%)	69	/	/	60 ≤ ES < 70	NF P 18-598
	Valeur au bleu de méthylène	0,38	/	/	/	NF P 18-592
	Coefficient d'absorption (%)	1,1	2.28	1,77	V _s = 2,5	XP P 18-545
Caractéristiques mécaniques	Essai Los Angles (%)	/	28	23	15 < LA < 100	NF P 18-573
	Essai Micro Deval (%)	/	25	17	12 < MD < 100	NF P 18-572

Les résultats, regroupés dans le tableau III.1, sont conformes aux spécifications des normes, tandis que la norme «NF P 18-598» concernant le sable, confirme que notre sable est un sable argileux de propreté admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.

➤ **COMPOSITION CHIMIQUE DES GRANULATS**

Outre les propriétés physiques des granulats, diverses caractéristiques chimiques sont à considérer en vue de l'utilisation d'un granulat dans le béton. Les caractéristiques chimiques des granulats utilisés sont représentés dans le tableau III.2.

Tableau III. 2: Caractéristiques chimiques des granulats utilisés

Propriétés mesurées (%)	Résultats	Références
Insoluble	1,9	NF EN 1744-1
Sulfates	Traces	
Carbonates	89	
Chlorure	0,29	

III.2.2. CIMENT

Le ciment utilisé pour cette étude expérimentale est un ciment de type CEM I/A 42,5 provenant de Tunisie. Les différentes caractéristiques que ce soit chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'usine même. Le tableau III.3 présente la composition chimique du ciment.

Tableau III. 3 : Composition chimique du ciment

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
Teneur en %	20,14	5,53	3.54	61.6	1.73	2.29	0,06	0,21	2.74

Le PAF représente le pourcentage de perte en poids subie par un échantillon de ciment après chauffage à 1000°C. Plus le PAF est élevée, moins la résistance du ciment se développera. L'ASTM limite le PAF à 3% tandis que la norme NF EN 197-1 le limite à 5%. Dans notre cas le PAF vérifié les deux limites prescrites (Tableau III.3). Le tableau III.4 présente la composition minéralogique du clinker :

Tableau III. 4 : Composition minéralogique du clinker

Composition des ciments	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)
CEM I utilisé	51.19	19.88	8.67	10.77
CEM I selon la norme ASTM	55	19	10	7

Selon le tableau III.4, le ciment utilisé à une teneur assez élevé en Alite « ciment Alitique », ce qui traduit par une haute résistance initiale. La teneur C₄ AF dépasse la valeur prescrite par

la norme ASTM mais cela n'a pas une influence significative car elle contribue très légèrement au gain de résistance. Cependant, agit comme un fondant pendant la fabrication et contribue aux effets de couleur qui rend le ciment gris. Le tableau IV.6 regroupe les propriétés physico-mécaniques du ciment.

Tableau III. 5: Les propriétés physiques du ciment

Temps de prise		Densité spécifique g/cm ³	Surface spécifique cm ² /g	f_{c28} (MPa)
Début (min)	Fin (min)			
170	255	3,1	3500	> 42,5

Les ciments doivent satisfaire à diverses exigences physiques de la norme NF EN 197-1 telles que le temps de début de prise dont les valeurs à respecter sont en fonction des classes de résistance. Suivant le type de ciment utilisé, le temps de début de prise doit être supérieur à 60 minutes ce qui est conforme avec nos résultats (Tableau III.5).

III.2.3. AJOUTS MINERAUX

Pour donner à l'étude un caractère pertinent et assez généralisé, il a été décidé de procéder aux travaux de recherche en considérant des ajouts minéraux de finesse et de nature différentes disponibles, en Algérie, comme déchets et sous-produits industriels. Quatre ajouts minéraux différents ont été utilisés dans cette étude ; les fillers calcaires, le laitier granulé de haut fourneau, la poudre de marbre et la poudre de verre.

➤ FILLER CALCAIRE

Le filler calcaire (FC) utilisé pour la formulation des BAPS, UF 20, est conforme à la norme NF P 18-508, fabriqué et fourni par la carrière ENG de l'est Algérien. Les principales caractéristiques physiques et chimiques proviennent des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'ENG. La surface spécifique et le poids spécifique étaient de 3900 cm²/g et 2.79 g/cm³ respectivement. Le tableau III.6 présente la composition chimique des fillers calcaires.

Tableau III. 6: Composition chimique des fillers calcaires.

Composant	CaCO ₃	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
Teneur en %	99	55.88	0.01	0.01	0.14	0.01	0.01	0.01	43.9

En ce qui concerne la morphologie des fillers calcaires utilisés, le diamètre moyen, pour lequel 50% des grains des fillers sont inférieur, est de l'ordre 25µ. 97% des éléments du fillers présentent un diamètre inférieur à 200µ et 15% présentent un diamètre inférieur à 10µ.

➤ LAITIER GRANULE DE HAUT FOURNEAU

Le laitier granulé de haut fourneau (LG) utilisé dans cette étude a été fourni par le complexe sidérurgique d'El Hadjar situé à Annaba. Il a la forme d'un sable de granulométrie 0/3 de couleur claire. Le LG a été finement broyé à l'aide d'un broyeur à boulets de capacité de 10kg pendant 8h. La surface spécifique et le poids spécifique étaient de 3300 cm²/g et 2.95 g/cm³ respectivement. Les valeurs portées sur le tableau III.7, relatives à sa composition chimique, indique des teneurs importantes de silice et de chaux.

Tableau III. 7: Composition chimique du laitier d'El Hadjar.

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	PAF
Teneur en %	37.19	5.58	2.31	42.29	4.69	1.04	1.08	1.34	3.28

La comparaison Fillers calcaires-Laitier montre que le laitier est moins riche en CaO et plus riche en SiO₂, Al₂O₃ et MgO que les fillers calcaires. D'après l'analyse chimique du laitier granulé obtenue (Tableau III.7), on peut calculer l'indice de basicité, en appliquant les formules souvent utilisées dans la littérature.

$$I_{b1} = \frac{CaO}{SiO_2} = 1.14$$

$$I_{b2} = \frac{CaO + MgO}{SiO_2} = 1.26$$

$$I_{b3} = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} = 1.1$$

A partir de la composition chimique du laitier granulé, l'indice d'activité a été calculé, en appliquant les formules citées dans la partie bibliographique.

$$I_a = \frac{Al_2O_3}{SiO_2} = 0.15$$

$$I_a = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} = 1.41 \geq 1$$

$$I_a = \frac{CaO + MgO + 0.66 Al_2O_3}{SiO_2 + 0.33 Al_2O_3} = 1.3 \geq 1$$

A partir des résultats obtenus, le laitier utilisé est un laitier basique, donc il est actif. Mais ces indices ne prennent en compte qu'une partie de la composition et, de plus, négligent d'autres paramètres, tels que la nature du clinker et la finesse [Guetteche et al, 2001].

➤ LA POUDRE DE VERRE

La poudre de verre utilisé est obtenue après le broyage de débris de verre triés et sèches au laboratoire. Le verre trié est effectué manuellement et consiste à les débarrasser des impuretés. Le verre trié est mis dans une étuve à 100°C, pour le sécher afin d'éliminer l'humidité avant de le broyer. Le broyage est effectué au moyen d'un petit broyeur à boulets de capacité de 10kg pendant 8h. La surface spécifique et le poids spécifique étaient de 4389 cm²/g et 2.5 g/cm³ respectivement. Le tableau III.8 présente la composition chimique de la poudre de verre :

Tableau III. 8: Composition chimique de la poudre de verre.

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	PAF
en %	70.47	1.52	0.31	8.81	2.62	0.42	14.85	0.16	0.79

Les valeurs portées sur le tableau III.8, relatives à sa composition chimique, indique une teneur importante en silice. En accord avec la norme ASTM C618-02 [ASTM C618, 2002] qui exige une somme de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ supérieur à 70% pour une bonne

pouzzolanité, la somme pour les échantillons étudiés est de 73%. Donc ils présentent une composition chimique satisfaisant et par conséquent, ils sont susceptibles de produire une bonne réactivité pouzzolanique.

Le remplacement total des fillers calcaires par la poudre de verre pourrait réduire sa densité car la densité de la poudre de verre était de 2,5 g/cm³ par rapport à celle des fillers calcaires de 2,7 g/cm³.

➤ LA POUDRE DE MARBRE

La poudre de marbre a été fournie par une usine de marbre et directement utilisé dans le BAP, sans aucun processus. La surface spécifique et le poids spécifique étaient de 4200 cm²/g et 2.76 g/cm³ respectivement. Le tableau III.9 regroupe les caractéristiques chimiques de la poudre de marbre.

Tableau III. 9 : Composition chimique de la poudre de marbre.

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	PAF
en %	0.12	0.05	0.10	55.54	1.07	0.01	0.01	0.06	43.04

Selon les analyses chimiques des fines recyclées (Tableau III.6,7,8,9), la poudre de marbre a la teneur la plus élevée en oxyde de calcium et la plus faible en aluminium, silice, ferrite, soufre, magnésium et sodium par rapport à la poudre de verre et au laitier granulé. Par contre, la teneur en oxyde de silice de poudre de verre est la plus élevée par rapport aux autres fines.

Concernant les caractéristiques physiques des fines, on note que les poudres de verre et de marbre ont une finesse plus élevée que celle des fillers calcaires. Et chacune d'elles ont une plus grande surface spécifique que celle du ciment. Au contraire, le laitier a une finesse plus faible que les fillers calcaires. Plus la finesse des matériaux minéralogiques est élevée, plus est la résistance procure pour ciment ainsi que l'activité pouzzolanique et hydraulique latente [Kirgiz, 2013].

La perte au feu (PAF) de poudre de marbre et des fillers calcaires est supérieure à celle de poudre de verre et du laitier (Tableau III.6,7,8,9). Cela est dû à leur teneur en CaCO₃ qui a également entraîné une plus grande perte au feu de poudre de marbre et des fillers calcaires.

III.2.4. EAU DE GACHAGE

L'eau utilisée pour la confection des différents mélanges est l'eau du robinet au niveau du laboratoire LMDC université Mentouri Constantine. Un échantillon de cette eau a été soumis à une analyse chimique dont les résultats recueillis sont présentés dans le tableau III.10.

Tableau III. 10: L'analyse chimique de l'eau (mg/l).

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

Les résultats obtenus répondent aux prescriptions de la norme NF EN 1008 relative à la concentration en matières en suspension et sels dissous.

III.2.5. ADJUVANT

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égales à 5% du poids de ciment permet d'améliorer certaines de ses propriétés. Un superplastifiant de type Medaflow 145 à base d'éther polycarboxylique modifié a été employé pour assurer une fluidité satisfaisante pour les différentes formulations. Il appartient aux familles des superplastifiants réducteurs d'eau. Les différentes caractéristiques sont présentées dans le tableau III.11.

Tableau III. 11: Les caractéristiques de superplastifiant.

Forme	Couleur	Masse volumique	Teneur en chlorures	PH
Liquide	Brun	7,0±1	1,05±0,02 g/cm ³	< 0,1%



Photo III. 1: Le superplastifiant utilisé.

III.3. COMPOSITIONS DES MELANGES RETENUS

La mise au point d'une formule de béton autoplaçant est une opération complexe qui exige de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles et un dosage approprié pour chacun de ses constituants afin d'obtenir une formulation qui satisfait les propriétés d'un tel béton à savoir la fluidité et l'homogénéité. Plusieurs approches ont été développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. La méthode de formulation adoptée dans notre étude est présentée dans le paragraphe ci-dessous.

III.3.1. METHODE DE FORMULATION ADOPTEE

Plusieurs méthodes de formulation des BAPs se sont succédées depuis les années 90 tel que la méthode japonaise [Okamura et al, 1994]; la méthode française (LCPC) [De Larrad et al, 1996] ; la méthode suédoise [O. Petersson et al, 1996], la méthode Taïwanaise [Su et al, 2001], et la méthode [Su et al, 2003] etc. Toutefois, ces méthodes ne répondent pas à tous les besoins pratiques.

En s'appuyant sur des méthodes existantes, une nouvelle méthode de formulation de BAP a été proposée par J. Shen et al [Shen et al, 2008]. Cette méthode a bien pris en considération les contextes de l'utilisation des BAPs dans l'industrie de préfabrication. Elle a l'avantage d'être relativement simple à appliquer du fait que seulement, deux types d'essai, à savoir essai de compactage pour le granulat et essai d'étalement pour la pâte, sont nécessaires pour déterminer tous les paramètres de formulation [Shen et al, 2008].

L'idée principale de cette méthode est synthétisée par les étapes suivantes :

- Optimiser la compacité des granulats en mesurant sa masse volumique avec différents rapports du sable sur le granulat « coefficient de compactage (PF) ».
- Calculer la quantité de liant (ciment et addition minérale) en se basant sur la résistance à la compression du BAP souhaitée et à l'aide de la formule de Bolomey
- Assurer la même fluidité pour les pâtes formant le liant (pâte de ciment et de pâte des fillers calcaires) sous l'influence de superplastifiant ;
- Déterminer le dosage du superplastifiant à l'aide de l'essai d'écoulement sur le mortier.

Des essais de conformité à l'état frais tel que l'essai d'étalement au cône d'Abrams, l'essai d'écoulement à la boîte en L et au V-funnel ainsi que l'essai de stabilité au tamis doivent être effectués pour vérifier la formulation du BAP. De plus, la comparaison entre la résistance envisagée et la résistance expérimentale doit être effectuée.

En appliquant la méthode proposée par J. Shen et al [Shen et al, 2008], des compositions des BAPs ont été obtenues. Les étapes de calcul sont citées dans le paragraphe suivant.

III.3.2. LES ETAPES DU CALCUL

La méthode de formulation utilisée pour concevoir les compositions des BAPs testées dans cette étude expérimentale est une méthode de calcul élaborée par J. Shen et al [Shen et al, 2008]. Elle permet d'optimiser le compactage des granulats et d'assurer une bonne fluidité des BAPs. C'est la raison pour laquelle cette méthode a été choisie. La procédure de la méthode est résumée dans les étapes suivantes :

Etape 1 : Calcul des granulats et du sable

La première étape de la méthode proposée consiste à calculer la quantité des granulats. Un coefficient de packing factor (PF) est introduit pour ajuster la teneur relative des granulats et de pâte. Le coefficient de compactage PF, défini comme étant le rapport de la masse volumique du granulat après et avant compactage, est obtenu au point correspondant au rapport optimal R granulat / sable :

$$PF = \rho_{avant} / \rho_{après}$$

Ainsi qu'en connaissant la quantité de granulats par unité de volume avant le mélanger avec la pâte, la quantité finale de granulats sera facilement déduite en la multipliant avec le PF [Shen et al, 2008]. Dans cette étude, le coefficient PF a été pris égal à 1.12 valeur recommandée par N. Su et al [Su et al 2001].

Le volume lâche du sable et de gravillon :

Les volumes lâches du sable et du gravillon sont respectivement désignés par V_s et V_g . Afin de déterminer V_s et V_g par rapport à un volume unitaire ($1m^3$), deux équations peuvent être établies:

$$\frac{\rho_s \times V_s}{\rho_s \times V_s + \rho_g \times V_g} = S/A \quad \text{et} \quad V_s + V_g = 1$$

$$\frac{\rho_s (1 - V_g)}{\rho_s (1 - V_g) + \rho_g V_g} = S/A$$

ρ_g : masse volumique du gravillon

ρ_s : masse volumique du sable

S/A : le rapport optimal entre Sable/Agrégats

La masse du gravillon et du sable :

La masse de sable m_s et celle de gravillon m_g sont respectivement déterminées par :

$$m_s = V_s \times \rho_s \quad \text{et} \quad m_g = V_g \times \rho_g$$

La masse totale des granulats :

La masse finale M_a d'agrégat dans un volume unitaire est obtenue en employant la définition de PF.

$$M_a = PF (m_s + m_g) = PF (\rho_s \times V_s + \rho_g \times V_g)$$

V_a est le volume des agrégats comprenant les vides. Par conséquent, des granulats supplémentaires M_{aa} devraient être ajoutés afin que le volume des granulats V_a rester inchangeable.

$$M_{aa} = (PF - 1) \times (m_s + m_g)$$

$$M_a = M_a + M_{aa}$$

Le volume total des granulats :

$$V_a = \frac{M_a}{\rho_{agregats}}$$

Le volume de la pâte :

Le volume de pate peut être calculé comme suit:

$$V_p = 1 - V_{agregats}$$

Etape 2 : Calcul de la quantité de ciment

Le liant équivalent peut être déterminé par :

$$L = C + K.A$$

K : le coefficient de prise en compte de l'addition. Si son indice d'activité à 28 jours est plus élevé que 0,71, k est égal à 0,25 sinon, k = 0 pour tous les autres cas.

La quantité d'eau nécessaire pour ce liant est calculée par la formule de Bolomey.

$$f_{c2} = G f_{ce28} \left(\frac{L}{E} - 0,5 \right)$$

avec

G est un coefficient lié aux propriétés des granulats dans notre cas $G = 0,57$.

L/E est le rapport Liant/ Eau

f_{ce28} est la résistance à la compression du ciment à l'âge de 28 jours.

f_{c28} est la résistance à la compression des BAPs à l'âge de 28 jours

La quantité de ciment C est obtenue par l'équation:

$$C = \frac{1000 \times (V_p - V_{air})}{\left(\frac{1}{d_c} + \frac{m}{d_f} + \frac{1 + km}{d_e \times \left(\frac{f_{c28}}{G \times f_{ce28}} + 0,5 \right)} \right)}$$

où

C : est la masse de ciment,

d_c est la gravité spécifique du ciment,

d_f est sa gravité spécifique de l'addition minérale

d_e est la gravité spécifique de l'eau qui égale à 1.

F est la masse d'addition minérale exprimée comme suit: $F = m \cdot C$

$$F = m \cdot C \rightarrow m = 0,25 \text{ pour } \frac{F}{(F + C)} = 20 \%$$

Le volume du ciment est déterminée par :

$$V_c = \frac{C}{1000d_c}$$

Etape 3 : Calcul de la teneur en fillers

$$F = \frac{\left(\frac{f_{c28}}{G \times f_{ce28}} + 0,5 \right) \left(1000 \times (V_p - V_{air}) - \frac{C}{d_c} \right) - \frac{C}{d_e}}{\frac{k}{d_w} + \frac{1}{d_f} \left(\frac{f_{c28}}{G \times f_{ce28}} + 0,5 \right)}$$

Le volume de fine minérale est déterminée par :

$$V_f = \frac{F}{1000d_f}$$

Etape 4 : Calcul de la quantité d'eau :

La masse de l'eau de gâchage est donnée par l'équation suivante :

$$W = 1000 \times d_e \times (V_p - V_c - V_f - V_{air})$$

Etape 6 : Calcul du dosage du superplastifiant

La quantité de superplastifiant $SP = n \times (C + F + S + G)$

Le pourcentage de l'adjuvant $SP \% = sp \times (C + F)/100$

Etape 7 : La correction du dosage en eau

$$E = E - (0,7 \times SP)$$

Etape 8: validation des calculs par les essais à l'état frais – essais de conformité

Les essais de vérification à l'état frais tels que l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à la boîte en L, la stabilité au tamis et l'écoulement à l'entonnoir sont effectués après le malaxage pour vérifier la formulation du BAP.

III.3.3. FORMULATIONS RETENUES

Afin de valoriser l'utilisation des fines recyclées locales en tant que ajouts minéraux dans les BAPs, deux séries de bétons autoplaçants ont été effectuées avec deux rapports F/L différents (0.1 et 0.2). Pour chaque série, une composition à base des fillers calcaires a été choisie comme référence dans cette étude. Le tableau III.12 présente les deux compositions de référence retenues dans 1m³ :

Tableau III. 12: Formulation des bétons autoplaçants de référence.

	CEM I	S 0/3	G 3/8	G 8/15	SP	Eau	Ajout	F / L	E / L
Série 1	460	833	356	492	9.2	204	51	0.1	0,39
Série 2	432	833	356	492	9.7	211	107,8	0.2	0,39

Trois autres mélanges ont été effectués à partir du BAP de référence pour chaque série (rapport F/L) on remplaçant les fillers calcaires par trois fines recyclées locales de nature différente la poudre de marbre, la poudre de verre et le laitier granulé de haut fourneau tout en conservant les mêmes quantités de ciment et les mêmes proportions granulaires.

III.4. FABRICATION ET CURE

Pour la confection des mélanges, plusieurs équipements et fournitures courants ont été utilisés afin d'avoir un composant bien homogène.

III.4.1. FABRICATION

Un des objectifs de cette étude visant à qualifier les bétons autoplaçants (BAP), étaient de caractériser leurs performances physiques et mécaniques. Les différentes formules étaient préparées dans un malaxeur à axe vertical et mouvement circulaire de capacité 180 litres, 380 V, 50 Hz, 3 (Photo III.2), suivant la norme NFP18-404.

Les bétons autoplaçants sont très sensibles à la teneur en eau. Les matériaux de base sont à la même température que le local de fabrication. La teneur en eau des granulats (gravillons et sable) est mesurée afin d'ajuster la quantité d'eau à introduire dans le malaxeur.



Photo III. 2 : Malaxeur utilisé.

La fabrication se déroule comme suit :

- Pré mouillage du malaxeur pour limiter une absorption supplémentaire de l'eau de gâchage par les parois du malaxeur.
- Introduction des constituants solides en deux lots, commençant par les granulats (Gravillons 3/8, 8/15 et sable 3/8) puis les fillers calcaires et le ciment.
- Malaxage puis introduction de l'eau et des adjuvants.

La figure III.2 résume les étapes de conception pour chaque mélange.

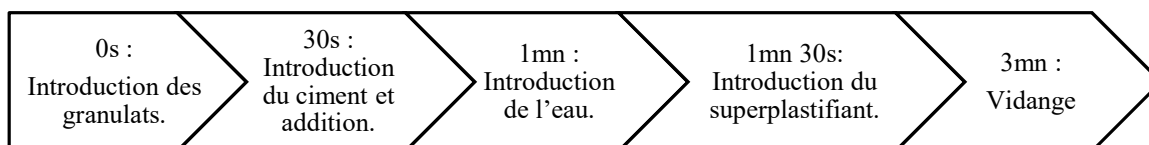


Figure III. 2: Les phases de malaxage.

III.4.2. MISE EN PLACE

Plusieurs formes de corps d'épreuve sont coulées pour chacune des compositions comme illustré dans la Photo III.3 :

- pour la résistance en compression : cylindres 10×20 cm.
- pour la résistance en traction par flexion : prismes 7×7×28 cm.
- pour mesurer le module d'élasticité : cylindres 16×32 cm.



Photo III. 3 : Les éprouvettes utilisées (a) Cylindriques 10x20cm (b) prismatiques 7x7x28cm (c) Cylindriques 16x32cm

Conformément à la norme NF P18-406, les éprouvettes cylindriques d'élancement 2, dont les extrémités sont préalablement rectifiées, sont utilisées pour l'essai d'écrasement en compression simple et du module d'élasticité.

III.4.3. CURE

Après la mise en place du béton dans les moules (fabrication des éprouvettes), ils sont laissés pendant 24 heures dans la salle de fabrication, à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, sous protection d'un film de plastique souple. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et conservées dans l'eau jusqu'au jour d'essai (Photo III.4).



Photo III. 4: Conservation des éprouvettes.

III.5. ESSAIS DE CARACTERISATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS


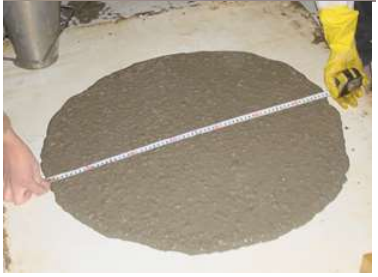

III.5.1. A L'ETAT FRAIS



Avant d'accepter une composition comme étant celle d'un BAP, il faut s'assurer que les propriétés du béton à l'état frais ont certains critères établis selon les recommandations. Différents essais spécifiques permettent de caractériser les BAPs à l'état frais. Dans cette étude la caractérisation s'est limitée aux essais recommandés par l'EFNARC [EFNARC, 2002]. Le tableau III.13 regroupe l'ensemble des valeurs préconisées pour un BAP en se référant aux principaux essais réalisés sur les bétons autoplaçants à l'état frais. A la sortie du malaxeur, la teneur en air est mesurée à l'aide d'un aéromètre à béton de 8 litres (Photo III.5) selon la norme NF P 18-353.



Photo III. 5: Aéromètre à béton.

Tableau III. 13: Essais de caractérisation des BAPs à l'état frais.

Essais	Paramètres mesurés	Valeurs recommandées	Photos
Etalement	Diamètre d'étalement SF (mm)	$650 \leq SF \leq 800$	
	Temps d'écoulement T ₅₀₀ (s)	$2 \leq T_{500} \leq 5$	
L-Box	Taux de remplissage H ₂ / H ₁	≥ 0.8	

V-Funnel	Temps d'écoulement VF (s)	$6 \leq VF \leq 12$	
Stabilité au tamis	Le pourcentage en poids de laitance P_{Laitance}	stabilité satisfaisante $P_{\text{Laitance}} < 15\%$	




La densité est aussi mesurée en utilisant le récipient inférieur de l'aéromètre remplis par le mélange avant la mesure de l'air occlus. Si P est le poids du récipient plein et P₀ le poids du récipient vide, la densité réelle ρ du mélange est déduite suivant la formule :

$$\rho = (P - P_0) / V$$

III.5.2. A L'ETAT DURCI

Les essais sur béton durci visent à vérifier l'homogénéité des propriétés du matériau en place. Au cours de cette partie, les propriétés mécaniques (résistance en compression, résistance en traction par flexion et module d'élasticité) des différents bétons ont été étudiées. Le tableau III.14 regroupe l'ensemble des essais réalisés sur les bétons autoplaçants à l'état durci.

Tableau III. 14: Essais de caractérisation des BAPs à l'état durci.

Essais	Echéances	Type et nombre d'éprouvettes	Photos
Résistance à la compression NF P 18-406	3, 7, 28 et 90 jours	3 éprouvettes cylindrique 10×20cm	
Résistance à la traction par flexion NF P 18-417	3, 7, 28 et 90 jours	3 éprouvettes prismatique 7×7×28cm	
Module d'élasticité NF EN 12390-3	7 et 28 jours	2 éprouvettes cylindrique 16×32cm	

III.6. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats de la caractérisation des mélanges sont présentés dans le but de générer un ensemble d'information suffisamment riche pour permettre de relier la composition des bétons avec leurs performances.

L'effet du remplacement total des fillers calcaires par des fines recyclées industrielles sur les caractéristiques frais et durci des BAPs a été observé. Trois fines recyclées de nature différente ont été utilisées : le laitier granulé de haut-fourneau (LG) comme de matériau

hydraulique latent, la poudre de verre (PV) comme de matériau pouzzolanique et la poudre de marbre (PM) comme matériau calcaire inerte. Tous les bétons ont été expérimentés dans les mêmes modalités.

III.6.1. VALIDATION SUR LES BAPS A L'ETAT FRAIS

Dans cette section, les résultats de la caractérisation de l'ouvrabilité des BAPS contenant des fines recyclées ont été présentés et discutés. À cet effet le Tableau III.15 résume les valeurs obtenues des essais de l'étalement, T500, boîte en L, stabilité au tamis, V-Funnel, teneur en air et masse volumique. Rappelons qu'un mélange est qualifié d'autoplaçant si toutes les conditions de fluidité, de viscosité, de résistance à la ségrégation et de capacité à s'écouler à travers des armatures sont remplis.

Tableau III. 15: Résultats de la caractérisation à l'état frais des mélanges.

Notations		F/L = 0.1				F/L = 0.2			
		FC	PM	PV	LG	FC	PM	PV	LG
Etalement	D _{moy} (mm)	730	700	710	740	750	730	740	760
	T ₅₀₀ (s)	3.02	4.65	4.52	3.3	2.99	3.56	4.02	2.95
Boite en L		0.94	0.83	0.88	0.88	0.83	0.82	0.81	0.96
Temps d'écoulement		7.29	7.65	8.35	10.29	11.33	11.59	10.49	9.68
Stabilité au tamis (%)		11.18	13.55	9.99	10	9.38	7.22	8.2	8.09
Air occlus (%)		1.2	1.7	2.1	1.3	2.6	2.6	2.8	2.9
Densité (kg/m ³)		2325	2319	2268	2293	2304	2292	2256	2289

D'après le tableau III.15, les compositions de BAP remplissent correctement les spécifications requises pour de tels bétons. L'ensemble des mélanges respectent le critère d'étalement et sont susceptibles à ce titre d'être des bétons réalistes au point de vue industriel.

De nombreuses constatations peuvent être faites concernant l'effet du remplacement total des fillers calcaires par des fines recyclées sur les propriétés frais des bétons autoplaçants :

➤ Capacité de remplissage

L'essai d'étalement est un système d'évaluation de la capacité du béton à se déformer sous son propre poids contre le frottement de la surface sans la présence d'une contrainte externe [Felekoglu et al, 2007]. Les valeurs de l'étalement obtenues par tous les BAPS immédiatement

après le processus de malaxage sont présentées dans la figure III.3. Les résultats prouvent que cette condition du cahier des charges a été correctement satisfaite par les divers bétons.

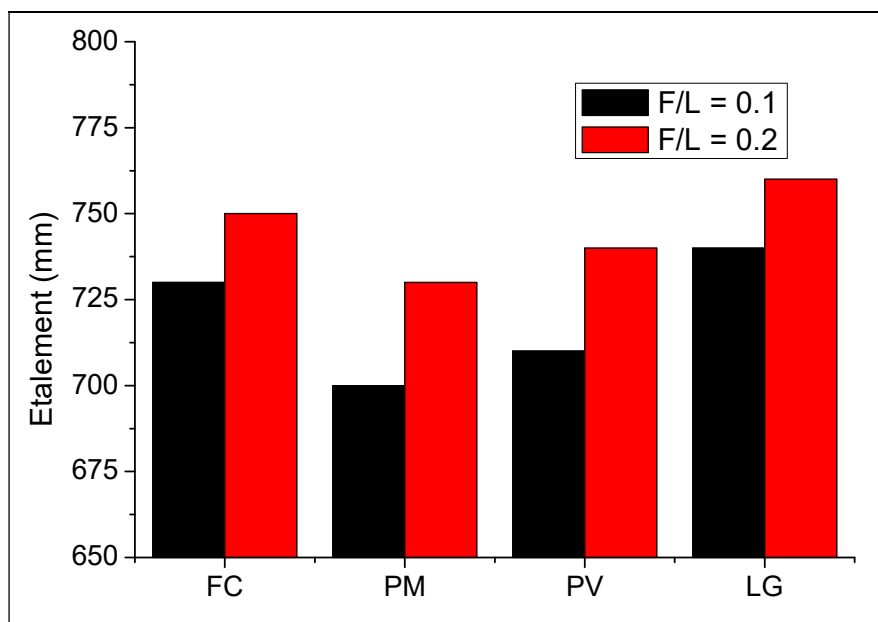


Figure III. 3: Résultats de l'essai d'étalement.

Les deux mesures d'étalement et de T_{500} sont en cohérence avec les valeurs données par les directives européennes [EFNARC, 2002]. L'étalement d'un béton autoplaçant peut varier entre 650 mm à 800 mm [EFNARC, 2002], et tous les mélanges étudiés sont dans cette catégorie. La demande en eau et l'ouvrabilité sont contrôlées par la forme et la distribution de taille des particules, l'effet filler des particules ainsi que la finesse et la texture de surface [Yahia et al, 2005].

Les résultats des essais d'étalement, présentés dans la figure III.3, indiquent que le remplacement des fillers calcaires par la poudre de marbre et la poudre de verre engendre une diminution de la fluidité. Ceci pourrait s'expliquer par la plus grande surface de ces particules qui augmentent la demande en eau [Sahmaran et al, 2006]. De plus, la forme angulaire de la poudre de marbre empêche l'ouvrabilité du BAP à cause de l'augmentation du frottement inter-granulaire. Ce qui explique son effet relativement négatif sur les propriétés de béton frais.

Le remplacement du filler calcaire par le laitier, ajout plus dense, a conduit à un volume total plus faible, une porosité plus importante et en particulier une demande en eau plus faible. Comme le dosage en eau est constant, pour tous les mélanges du même rapport F/L, on

obtient très logiquement une meilleure fluidité. Ce phénomène est expliqué par les caractéristiques des surfaces des grains de laitier qui permettent un meilleur glissement inter granulaire dans la pâte [Manai, 1995]. Nos résultats sont en cohérence avec ceux de M. Uysal et al [Uysal et al, 2011b]. Selon A. Yahia et al [Yahia et al, 2005], les particules fines de laitier remplissent les vides disponibles entre les particules du mortier, augmentant ainsi la compacité du mélange en améliorant l'arrangement total des particules dans la matrice. Par conséquent la quantité d'eau qui occupait ces vides est libérée dans la solution interstitielle, ce qui se traduit par une meilleure fluidité.

Les temps mesurés pour atteindre une galette de 500 mm de diamètre (T_{500}) sont proches des valeurs couramment rencontrées. Tous les mélanges ont montré les délais requis dans l'intervalle de 2-5 s ce qui signifie les limites inférieures et supérieures de temps T_{500} . On constate aussi qu'un étalement élevé interprète un béton moins visqueux peut-être les bulles d'air prisonniers pourraient aider l'écoulement. Donc l'étalement est relatif au pourcentage d'air occlus, un accroissement de cette teneur en air occlus dégagerait une élévation de la valeur de l'étalement.

Pour tous les mélanges de BAP, on constate que l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était très faible voire absente. De plus, les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton.

En plus de l'essai d'étalement et de T_{500} , l'essai V-Funnel a également été réalisé pour évaluer la fluidité et la stabilité des BAPs. Un temps d'écoulement plus long représente une viscosité plus élevée et elle est directement liée à une meilleure résistance à la ségrégation.

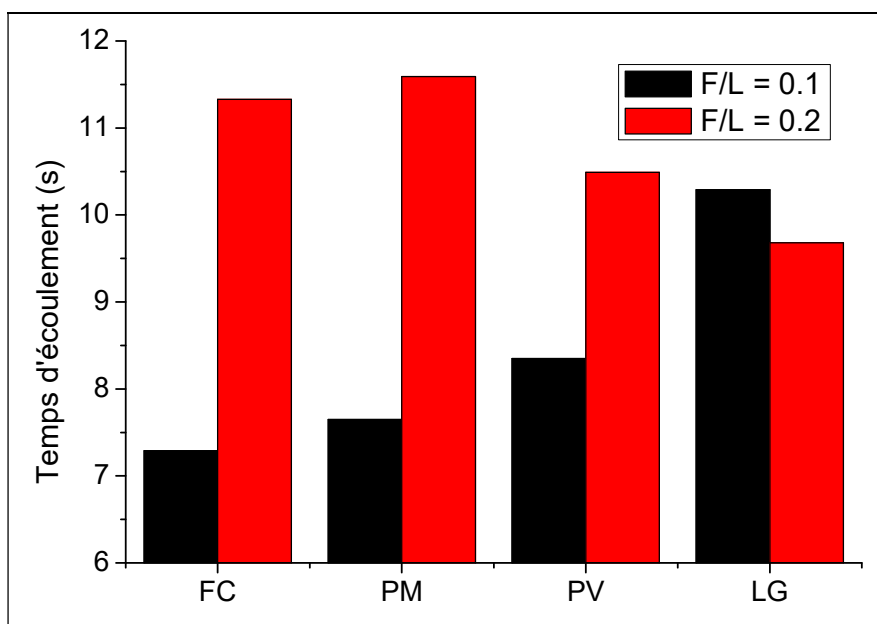


Figure III. 4: Résultats de l'essai V-Funnel.

D'après la figure III.4, on observe que les temps d'écoulement requis sont en bon accord avec les valeurs données par les directives européennes EFNARC [EFNARC, 2002]. Tous les mélanges ont montré les délais requis dans l'intervalle de 6 à 12s ce qui signifie les limites inférieures et supérieures de temps d'écoulement par V-Funnel, respectivement. L'augmentation de dosage en fillers calcaires et en poudre de marbre a augmenté la viscosité des mélanges. Ce résultat peut être attribué à la finesse des fines [Gesoğlu et al, 2012].

➤ *Capacité de passage*

Sur la ségrégation dynamique des BAPs, les résultats représentés par la figure III.5 sont conformes à ce que l'on peut attendre d'un béton autoplaçant. Cependant, le plus important dans cet essai est que le béton testé s'écoule à travers les armatures correctement. Sur ce point, aucun problème n'est à signaler puisque tous les BAPs présentent des taux de remplissage supérieur à 0,80.

Il est à noter que chaque BAP étudié dans la présente étude a une capacité de remplissage et de passage adéquat.

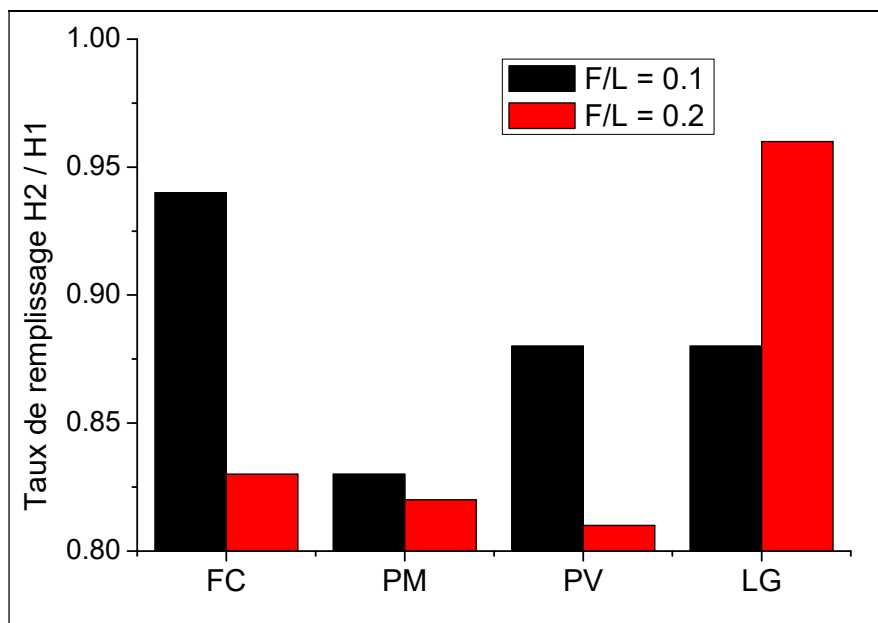


Figure III. 5 : Résultats de l'essai Boite en L.

L'augmentation du rapport F/L des mélanges à base de laitier provoque une diminution de la viscosité qui se traduit par une augmentation du taux de remplissage H_2/H_1 . Cela est dû à la faible finesse du laitier ($3300 \text{ cm}^2/\text{g}$) par rapport au ciment ($3500 \text{ cm}^2/\text{g}$). Contrairement aux autres fines (FC, PM et PV) qui ont des finesses supérieures à celle de ciment ($3900 \text{ cm}^2/\text{g}$, $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$ et $4389 \text{ cm}^2/\text{g}$ respectivement). Donc, l'augmentation de la viscosité du béton rend l'écoulement difficile et peut entraîner, un blocage du béton.

➤ *Résistance à la ségrégation*

Pour obtenir une pièce en béton autoplaçant de bonne qualité, il est nécessaire que le béton ait une fluidité importante et présente une bonne aptitude au remplissage pour effectuer une mise en place correcte. Mais cela n'est pas suffisant; il faut également, qu'une fois mis en place, les gravillons ne ségrégent pas, pour conserver à la pièce des propriétés mécaniques homogènes. Pour cela, des essais de stabilité au tamis ont été effectués afin de caractériser la ségrégation statique. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III.6.

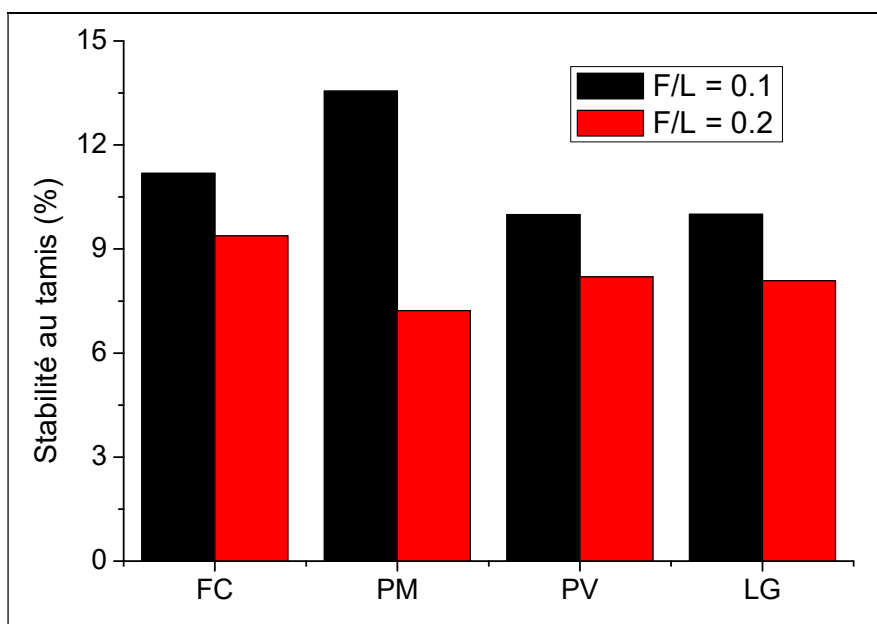


Figure III. 6: Résultats de l'essai de stabilité au tamis

Selon la figure III.6, tous les BAPs ont un taux de ségrégation inférieur à 15 %, synonyme d'une stabilité correcte. A signaler aussi que l'absence d'emploi d'agent de viscosité dans la composition des BAPs n'a pas généré une élévation du taux de ségrégation.

D'autre part, les temps d'écoulement obtenus par l'essai V-Funnel (Figure III.4), indique que le remplacement des fillers calcaires par la poudre de marbre, la poudre de verre et le laitier granulé a garanti un niveau de viscosité convenable permettant de diminuer le risque de ségrégation et améliorer l'étalement.

➤ *L'air occlus et la densité*

Les résultats de teneur en air et la densité sont représentés dans la figure III.7. La teneur en air des BAPs est augmentée en augmentant le dosage en ajout.

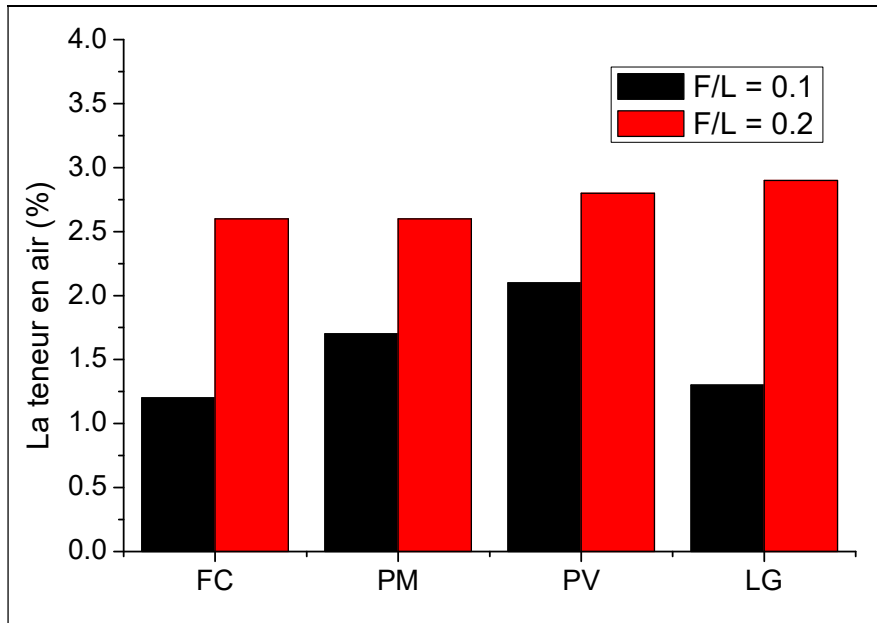


Figure III. 7: Résultats de l'essai de l'air occlus.

En raison de cette augmentation de la teneur en air, la densité de ces mélanges BAP a également diminué comme le montre la figure III.8.

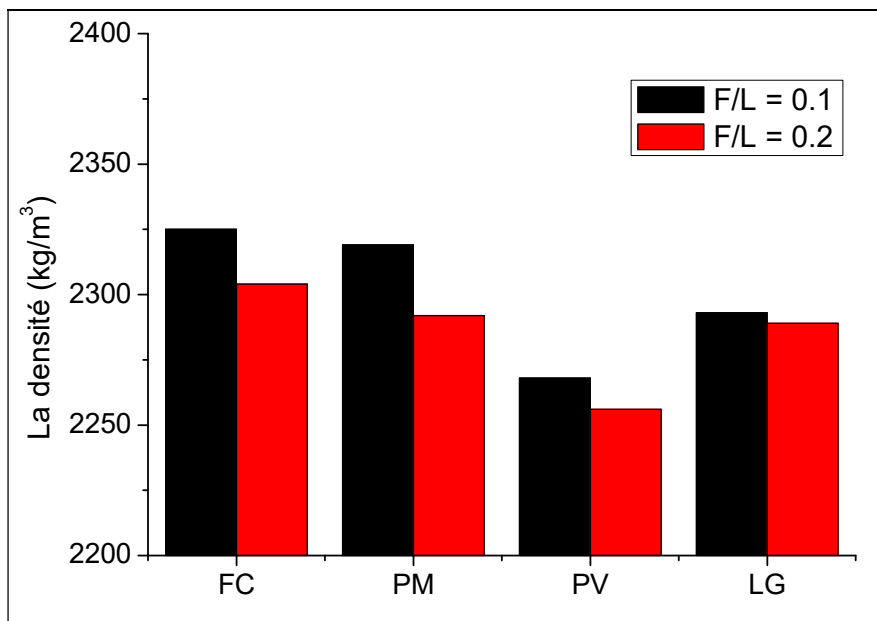


Figure III. 8: Résultats de la densité.

D'après la figure III.8 on constate que la différence des densités est conditionnée par le type des fines. Les mélanges témoins à base des FC représentent une densité plus élevée par rapport aux autres mélanges. En outre, les mélanges à base de la poudre de verre ont la plus

faible densité due à son poids spécifique inférieure à celui des fillers calcaires qu'ils remplacent.

En général, les bétons autoplaçants fabriqués au laboratoire sont capables d'être des bétons réalistes au point de vue industriel, car on constate que la totalité des bétons autoplaçants réserve le critère d'étalement.

III.6.2. PERFORMANCES DES BAPS A L'ETAT DURCI

Dans ce paragraphe, on examine le développement des propriétés mécaniques des différents bétons étudiés, en fonction de la nature des fines recyclées utilisées. Les conditions de mûrissement sont les mêmes pour les différents bétons. Les résultats obtenus permettent de formuler les remarques suivantes :

➤ RESISTANCES A LA COMPRESSION

La résistance mécanique en compression est une propriété fondamentale du matériau béton. Par conséquent, sa détermination et son développement ont été suivis pour toutes les compositions de bétons testées dans ce travail.

Les résultats de la résistance à la compression à 3, 7, 28 et 90 jours sont illustrés sur la Figure III.9. Les valeurs obtenues représentent la moyenne de trois cylindres testés pour chaque béton à chaque échéance. Globalement, on remarque d'une part, une nette évolution des résistances de tous les mélanges. D'autre part, tous les BAPs atteignent une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 40 MPa.

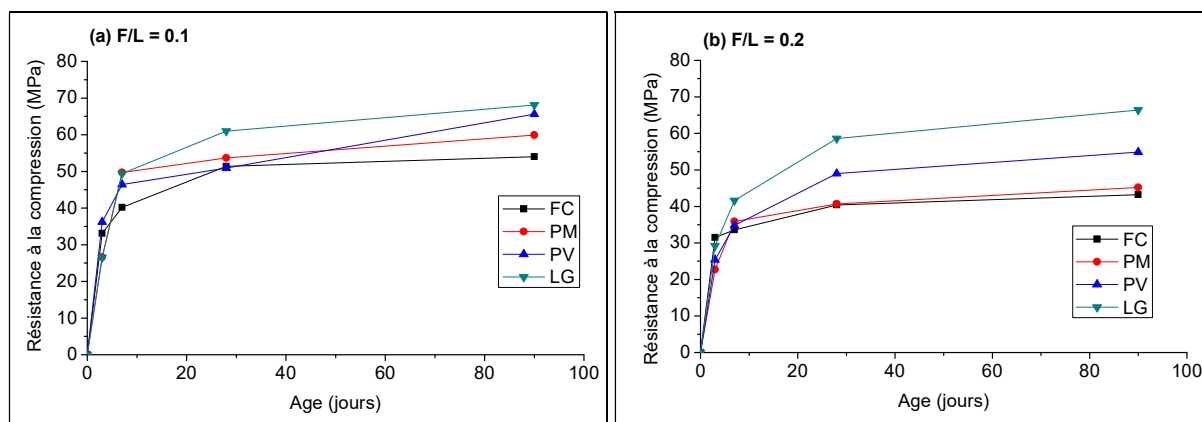


Figure III. 9: L'évolution de la résistance à la compression.

D'après la figure III.9 (a et b) on constate que les deux mélanges témoins à base de filler calcaire présentent les plus faibles performances car ce dernier agit comme un ajout inerte en réduisant la résistance en compression. Par contre, le mélange le plus édifiant et le plus performant est celui de laitier granulé. Ceci est dû à l'interaction entre l'activation du laitier et à son activité pouzzolanique traduite par l'augmentation du dégagement de chaleur [Oudjit et al, 2011]. Selon sa composition chimique, le laitier utilisé est considéré comme un ajout hydraulique latent qui ne peut être mobilisés que dans un milieu fortement basique [Zeghichi, 2006]. Donc, dans un milieu alcalin pendant l'hydratation du ciment, le laitier riche en chaux (CaO) réagisse en formant des composés semblables aux hydrates de ciment portland CSH mais en durcissant de manière plus lente que ce dernier [Bezzi, 2011]. Aussi, il ne faut pas négliger le rôle de la silice (SiO₂) qui consiste à améliorer la microstructure de la pâte en fixant la Portlandite CH libérée par l'hydratation du ciment. Cette réaction pouzzolanique donne naissance à des silicates de calcium hydratés supplémentaires (CSH), responsable du durcissement de la pâte de ciment [Naceri et al, 2006], [Uysal et al, 2011b]. D'autre part, une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation la teneur en laitier à tous les âges a été observée mais cette diminution est moins importante à long terme (28 et 90 jours). Ces résultats sont en cohérence avec ceux obtenu par [Boukendakdji et al, 2009], [Vanjare et al, 2012].

Le remplacement des fillers calcaires par la poudre de marbre entraine une amélioration de la résistance en compression pour toutes les échéances. M. Uysal et al [Uysal et al, 2011b] ont trouvé le même résultat en testant des bétons autpolaçants contenant des fillers calcaires, poudre de marbre et poudre de basalte ayant les même taux de substitution. La résistance à la compression régit par la nature physique de la poudre de marbre due à la matrice dense et la meilleure dispersion des grains de ciment [Bonavetti et al, 2003]. En outre, les grains de PM favorisent la formation de la nucléation hétérogène responsable des produits de réaction précoces CH et CSH, qui accéléreront l'hydratation de clinkers de ciment (en particulier C3S) et par conséquent augmenter les valeurs de résistance à la compression aux jeunes âges [Sari et al, 1999], [Lawrence et al, 2005].

La poudre de marbre est plus fine par rapport au filler calcaire et au ciment. L'effet de nucléation sur la résistance dépend de l'affinité de l'ajout minéral aux hydrates de ciment, et elle augmente avec la finesse et la surface spécifique de l'ajout minéral. En outre, la poudre de

marbre n'est pas pouzzolanique, ni totalement inerte car il réagit avec les phases d'alumine de ciment. Si le ciment contient une quantité appréciable d'aluminate tricalcique (C_3A), le carboaluminate de calcium sera produit à partir de la réaction entre le carbonate de calcium ($CaCO_3$) de la poudre de marbre et le C_3A [Bonavetti et al, 2001], [Vuk et al, 2001], [Uysal et al, 2011b]. Cette réaction, avec l'accélération de l'hydratation et l'augmentation de la résistance à la compression, augmente avec la teneur en C_3A du ciment, la finesse et la surface spécifique de l'ajout minéral. Cependant, la poudre de marbre entraîne une augmentation des performances au jeune âge de BAP puis elles ont tendance à se stabiliser. De plus, on note que l'amélioration des performances engendrées par la poudre de marbre diminue avec l'augmentation du rapport F/L.

D'après la figure III.9, on constate une augmentation de la résistance, au jeune âge et à long terme, des BAPs contenant de poudre de verre par rapport au béton témoin à base des fillers calcaires. Selon R. Nassar et al [Nassar et al, 2011] la résistance relativement plus élevée au jeune âge de béton à base de la poudre de verre pourrait être attribuée à la forte teneur en Na_2O dans le sous-produit (16%). Quant à long terme, G. Shakhmenko et al [Shakhmenko et al, 2010] ont attribué cette augmentation à la faible absorption d'eau de la poudre de verre. En accord avec la norme ASTM C618-02 [ASTM C618, 2002] qui exige une somme de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ supérieur à 70% pour une bonne pouzzolanité, la somme pour l'ajout utilisé est de 73%. Donc, il présente une composition chimique satisfaisante et par conséquent, il est susceptible de produire une bonne réactivité pouzzolanique qui se traduit par des bonnes résistances mécaniques. En outre, on constate que l'augmentation du dosage en poudre de verre engendre une diminution de la résistance en compression en particulier au jeune âge. Confirmant ainsi les résultats obtenus par [Schwarz et al, 2008], [Lui, 2011], [Vanjare et al, 2012]. Selon S. Chekireb [Chekireb, 2015], cette diminution est occasionnée par l'effet de dilution des C-S-H. Au-delà de 28 jours, la résistance augmente significativement présentant une réaction pouzzolanique ayant lieu dans cette période.

➤ **RESISTANCES A LA TRACTION PAR FLEXION**

La résistance à la traction par flexion est une des propriétés fondamentales les plus importantes du béton. Tous les bétons ont généralement des faibles résistances en traction (10% de la résistance en compression) et une faible capacité de déformation [Najim et al 2012]. Cependant, la résistance à la traction est importante dans la conception des autoroutes

et dalles aérodromes lorsque la résistance de cisaillement et la résistance à la fissuration sont prioritaires. L'ajout des fines recyclées au BAP Aggravent ces faiblesses et insuffisances. Donc des essais de résistance à la traction par flexion ont été effectués pour évaluer l'incidence des fines recyclées dans les BAPS. Les résultats sont illustrés dans la figure III.10. Les valeurs obtenues représentent la moyenne de trois prismes testés pour chaque béton à chaque échéance.

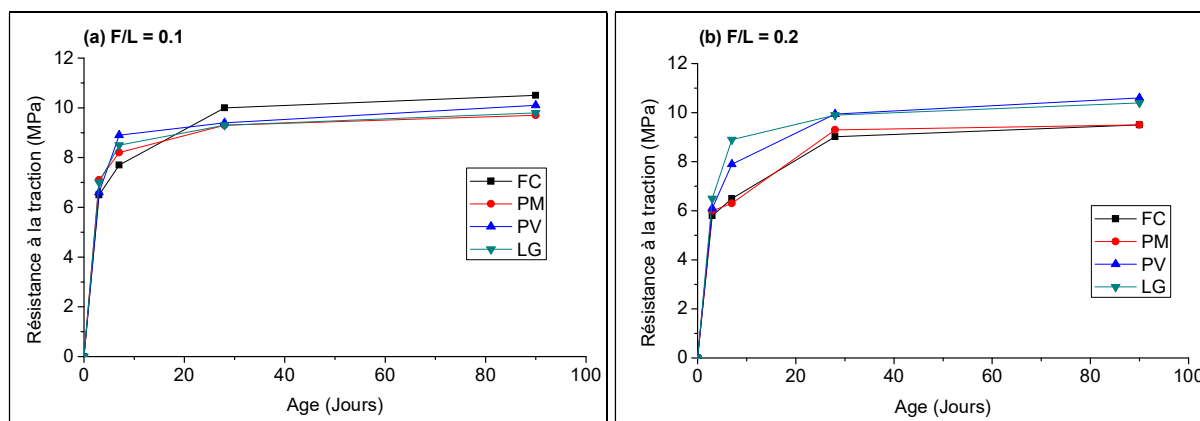


Figure III. 10: L'évolution de la résistance à la traction par flexion.

D'après la Figure III.10, on constate que, pour un rapport $F/L = 0.1$, le béton témoin à base des fillers calcaires présente une résistance à la traction par flexion un peu plus élevée par rapport aux BAPS à base des fines recyclées. Par contre on constate l'inverse pour un rapport $F/L = 0.2$. Les éprouvettes de LG et de PV ont eu des résistances plus élevées que celles du béton témoin. Quant aux éprouvettes de PM, les résistances à la traction ont été légèrement supérieures à celles du FC. Ces résultats sont en cohérence avec ceux de S. Bensalem et al [Bensalem et al, 2014]. Dans les BAPS, la teneur élevée en fines peut augmenter le retrait résultant en une micro-fissuration dans la zone interfaciale de transition (l'ITZ) ce qui affecte la résistance à la traction [Najim et al 2012].

➤ MODULE D'ELASTICITE

Le module d'élasticité statique est le rapport entre la contrainte et la déformation correspondante dans le domaine élastique. La mesure du module est effectuée à l'aide d'un extensomètre mécanique qui permet de faire des mesures de déformation sur deux directions des cylindres pendant cinq cycles de mise en charge. Le calcul du module est effectué à partir des déformations enregistrées entre 30% et 50% de la résistance en compression du dernier

cycle. Le module d'élasticité est déterminé après avoir tracé la courbe contrainte/déformation correspondant à la pente de chargement.

A deux échéances, 7 et 28 jours, le module d'élasticité a été déterminé. La figure III. 11 illustre l'évolution du module d'élasticité pour les BAPs étudiés en fonction de la nature des fines recyclées.

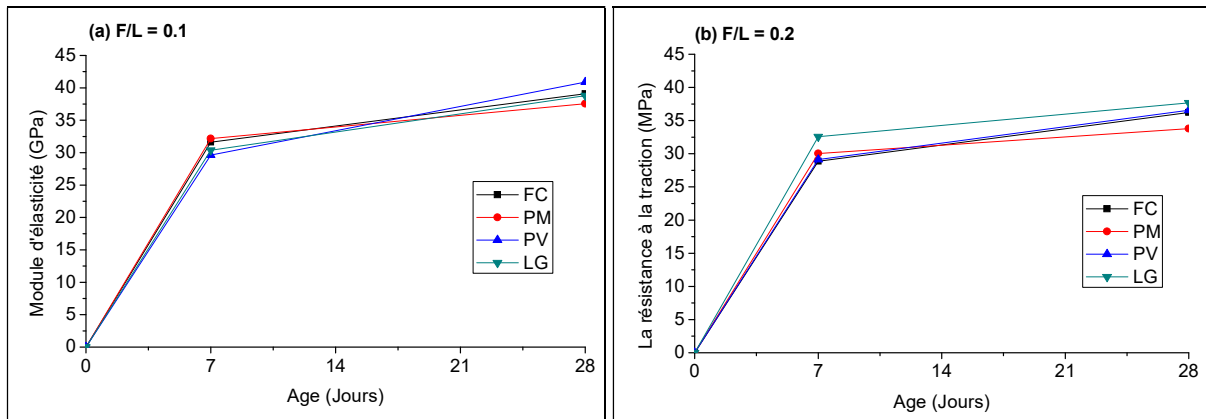


Figure III. 11: L'évolution du module d'élasticité des BAPs.

Comme pour la résistance en compression, le développement du module d'élasticité des bétons autoplaçants est semblable. Tous les bétons ont un module d'élasticité qui dépasse 33 GPa à 28 jours avec des valeurs comprises entre 33 et 41 GPa. D'après la figure III. 11, on constate que la rigidité évolue rapidement au jeune âge puis a tendance de se stabiliser par la suite, ces résultats sont attribués à une décroissance des réactions d'hydratation, et donc à une consolidation des bétons.

Il paraît intéressant de relier ces valeurs de module d'élasticité avec les résistances mécaniques expérimentales, comme c'est le cas dans de nombreux codes de calculs (Eurocode 2, Règles BAEL). L'Eurocode 2 [Eurocode 2, 2001] préconise la formule suivante pour l'estimation du module d'élasticité :

$$22(f_{cm}/10)^{0,3}$$

Avec f_{cm} la résistance moyenne en compression.

Les règles BAEL [BAEL, 1999], quant à elles, définissent le module égale à :

$$11000(f_c)^{1/3}$$

Dans cette formule, f_c indique la résistance en compression caractéristique qui égale forfaitairement à $f_{cm} / 1,15$. Le tableau III.16 regroupe les résultats de module d'élasticité mesurés et calculés des bétons autoplaçants étudiés.

Tableau III. 16: Modules d'élasticité mesurés et calculés des bétons étudiés.

Module d'élasticité (GPa)		F/L = 0.1				F/L = 0.2				
		FC	PM	PV	LG	FC	PM	PV	LG	
7 jours		31.62	32.18	30.36	29.62	28.87	30.03	29.12	32.58	
28 jours		39.08	37.56	38.81	40.89	36.21	33.78	36.57	37.66	
Calculé	BAEL 91 $11000(f_c)^{1/3}$	7 jours	36.76	37.2	35.28	33.91	35.6	36.22	35.82	38.86
		28 jours	44.22	42.14	43.41	46.09	38.75	36.62	39.03	41.15
	Eurocode 2 $22(f_{cm}/10)^{0,3}$	7 jours	32.66	33.01	31.47	30.37	31.73	32.23	31.91	34.33
		28 jours	38.57	36.93	37.93	40.03	34.25	32.54	34.47	36.15

On constate une relation acceptable avec les valeurs réelles et les valeurs calculées par l'Eurocode 2 et les règles BAEL. D'après le tableau III.16, on n'examine pas des comportements étranges de la part des différents bétons autoplaçants étudiés. A 7 jours, on constate une sur estimation de module d'élasticité calculé par rapport au module d'élasticité expérimental. A 28 jours, on remarque que les valeurs de module d'élasticité expérimental et celles estimés par l'Eurocode 2 sont proches.

III.7. CONCLUSION

Ce chapitre a pour objectif d'évaluer la faisabilité de l'utilisation des fines recyclées comme des substituts totaux des fillers calcaires dans la production des BAPs. Cette évaluation consiste à étudier les propriétés de ces bétons à l'état frais et durci.

Les bétons autoplaçants à base des fines recyclées effectués présentent des bonnes ouvrabilités avec des résistances en compression, à l'âge de 28 jours, proches voire supérieures à celle du béton témoin à base des fillers calcaires ce qui rend possible d'utiliser avec succès les fines recyclées comme des substituts totaux des fillers calcaires dans la production de BAP. Le mélange le plus coulant et le plus résistant mécaniquement est celui

obtenu avec le laitier de haut fourneau. Concernant les bétons autoplaçants à base de la poudre de marbre et la poudre de verre les résultats obtenus donnent satisfaction.

Les bonnes performances mécaniques fournies par tous les bétons autoplaçants confectionnés, varient entre 40 à 69 MPa, peuvent les installer sur le marché de construction comme des bétons d'ouvrage ce qui rend indispensable de vérifier leur qualité durable à savoir le comportement différé à long terme ainsi que la durabilité.

D'autre part, le BAP présente beaucoup de fines et par conséquent plus de pâte la première notion est donc d'évoquer que ces bétons pourraient avoir des déformations différées plus conséquentes et donc pourraient être l'origine de dommage sur les constructions ce qui nécessite une étude approfondie des comportements différés, retrait et fluage, des BAPs élaborés.

C'est dans cette optique s'inscrit le chapitre suivant et porte sur l'étude du comportement différé des bétons autoplaçants à base des fines recyclées locales, en s'appuyant sur l'effet du remplacement total des fillers calcaires par la poudre de verre, la poudre de marbre et le laitier granulé de haut fourneau.

CHAPITRE IV : ETUDE DU COMPORTEMENT DIFFERE DES BETONS AUTOPLAÇANTS A BASE DES FINES RECYCLEES RETENUES.

IV.1. INTRODUCTION

Selon le chapitre précédent, il est faisable le remplacement total des fillers calcaires par des fines recyclées sans nuire les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton autoplaçant. Cependant, il est important d'étudier le comportement différé du matériau dans le but de concevoir et de construire des structures adéquates, sécuritaires et durables. L'évaluation du comportement différé, retrait et fluage, des BAPs est important en raison de leur effet sur la perte de précontrainte, la détermination de la charge et le fonctionnement des éléments de structure. Donc, l'objectif de cette partie expérimentale est d'évaluer l'influence du remplacement total des fillers calcaires par des fines recyclées sur les comportements différés des bétons autoplaçants.

Ce chapitre sera échelonné en deux parties. La première s'articule sur l'étude du retrait libre et la deuxième porte sur l'étude de fluage flexionnel sous deux modes de conditionnement endogènes et de dessiccation. Chaque partie est présentée comme suit : tout d'abord, des généralités sur le phénomène étudié où les mécanismes d'action sont brièvement discutés, suivi par la campagne expérimentale effectuée et en fin les résultats et discussions. Dans ce chapitre, les dispositifs expérimentaux sont détaillés ainsi que la méthode de préparation des éprouvettes avant essais. Les différents essais ont été effectués au Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de l'Université Mentouri Constantine.

IV.2. ETUDE DE RETRAIT

IV.2.1. GENERALITES SUR LE PHENOMENE DE RETRAIT

Après la prise, le béton, qui est devenu un solide poreux, va encore subir divers déformations volumiques appelé « Retrait ». Les causes de ces déformations peuvent être classées en trois catégories : le retrait thermique, le retrait hydrique et le retrait de carbonatation. On s'intéresse au cours de cette étude au retrait hydrique.

Le retrait hydrique représente une contraction du matériau due à la perte progressive de l'eau libre ou adsorbée contenue dans les pores capillaires du béton. Ce retrait peut être divisé en deux. **Le retrait endogène ou d'autodessiccation** qui est la déformation du béton au cours de son hydratation dans des conditions adiabatiques, sans aucun échange d'humidité avec l'environnement extérieur et **le retrait de dessiccation** qui représente la déformation provoquée par l'échange d'humidité entre la structure poreuse de la pâte et le milieu environnant. Suite à cet échange, tant que l'humidité relative de l'environnement est inférieure à celle de la pâte, pâte de ciment va se contracter. Dans la suite, les mécanismes gouvernant les retraits hydriques seront présentés.

IV.2.1.1. MECANISMES DE RETRAIT ENDOGENE

Ce retrait est la conséquence de l'absorption d'eau des pores capillaires due à l'hydratation du ciment non hydraté, phénomène connu comme l'autodessiccation. L'hydratation du ciment s'accompagne d'une diminution de l'humidité interne ce qui résulte à une pression capillaire. Cette dernière va générer une variation volumique « retrait endogène » d'autant plus importante que le diamètre des pores est faible. Ces pressions capillaires peuvent provoquer une microfissuration et une redistribution des contraintes.

➤ Mécanisme de la pression capillaire

La pression capillaire est liée au phénomène d'autodessiccation. Dans un pore, ils se forment des ménisques à l'interface entre la phase liquide et la phase gazeuse (air + vapeur), en générant une pression dans le fluide résultant en un rétrécissement des orifices (Figure IV.1).

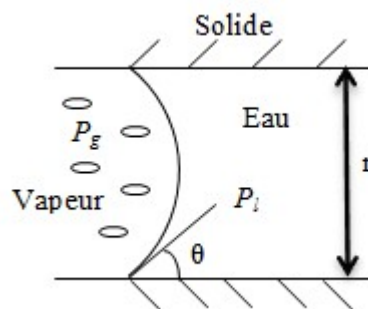


Figure IV. 1: Interface liquide/gaz dans un pore non saturé.

La relation de Laplace relie la pression du liquide p_l et la pression du gaz p_g à la tension de surface du liquide σ , au rayon du pore r , et à l'angle θ que fait la tangente du ménisque avec les parois du pore:

$$p_g - p_l = \frac{2\sigma}{r} \cos \theta$$

Selon la relation de Kelvin-Laplace, la pression capillaire ($p_g - p_l$) dépend de l'humidité relative h .

$$p_g - p_l = \frac{\rho_{eau}RT}{M} \ln(h)$$

où ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau, R la constante des gaz parfaits et M la masse molaire de l'eau.

IV.2.1.2. MECANISMES DE RETRAIT DE DESSICCATION

Le retrait de dessiccation se produit par diffusion de l'eau vers les faces exposées au séchage en présence d'un gradient hydrique entre le cœur du béton et l'ambiance extérieure. Ce déséquilibre hygrométrique observé provoque un gradient de contraintes capillaires amène par auto-équilibre de compression au centre et de traction aux extrémités. Ces tractions aux extrémités peuvent conduire à une fissuration en peau et donc à une relaxation partielle des contraintes (figure IV.2) [Benboudjema et al, 2005] [Ollivier et al, 2008].

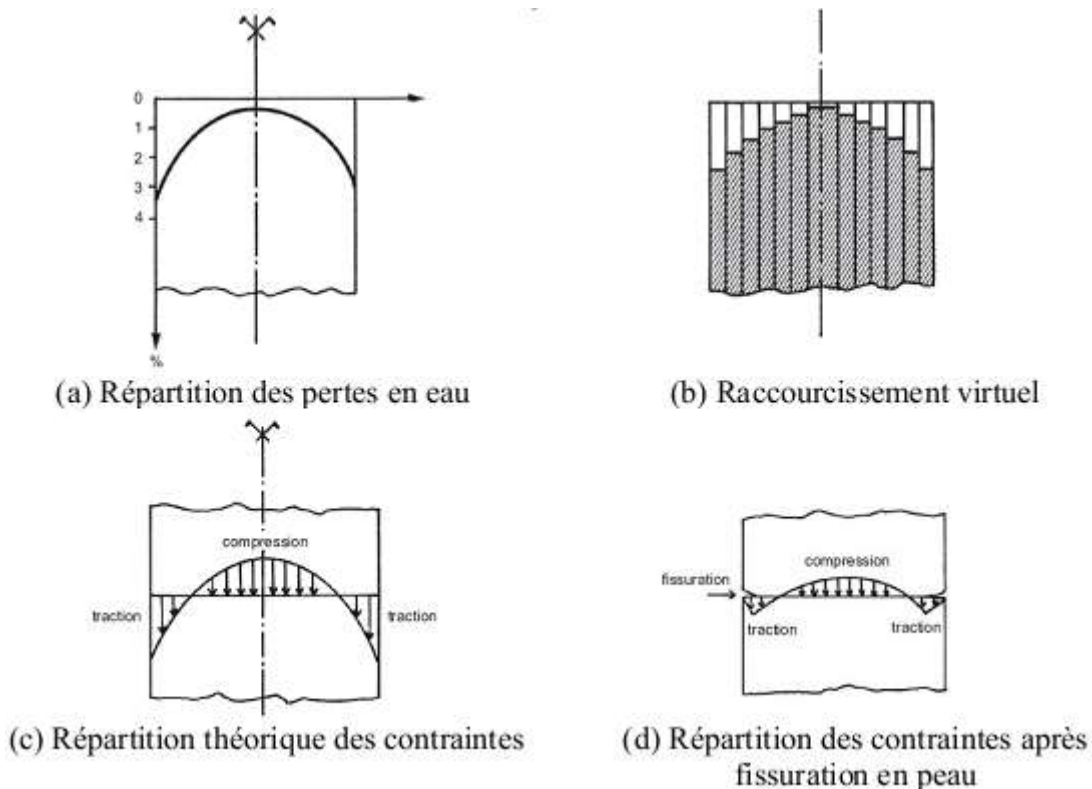


Figure IV. 2: Autocontraintes de structure dues au retrait de séchage [Pons, 1998] cité par [Ollivier, 2008]

Plusieurs auteurs [Wittmann, 1982], [Neville, 2000] conviennent que la distribution des pores et les caractéristiques du gel C-S-H ont une influence prépondérante sur la déformation de retrait de dessiccation. Bien que la dépression capillaire soit l'explication la plus axiomatique du phénomène de retrait de séchage, ce dernier résulte non seulement de ce mécanisme, mais plutôt de la combinaison de plusieurs mécanismes.

Trois différents mécanismes sont fournis pour expliquer le retrait de dessiccation [Baron et al, 1982], [Baroghel-Bouny, 1994], [Hua, 1995], [Tazawa et al, 1995]:

➤ Variation de la dépression capillaire

La dépression capillaire est la première théorie amenée par Freyssinet en 1929 [Baron et al, 1982], [Fortin, 2005] expliquer les mécanismes de retrait. Elle résulte de l'équilibre liquide-vapeur dans la porosité capillaire du béton.

Lorsque l'humidité relative dans béton diminue, la pression de l'eau liquide qui s'applique sur les parois des pores diminue et devient négative et provoquent une tension capillaire. Sous l'effet de cette contrainte, le squelette solide se déforme et une contraction, correspondant au retrait de dessiccation, est produite dans l'élément en béton.

Cette théorie est basée sur les lois de Kelvin et Laplace. Ces lois stipulent que l'augmentation de la contrainte capillaire tandis que la taille des pores diminue. Selon Young [Young et al., 1986] cité par [Fortin, 2005], la théorie du dépression capillaire est valable que pour une humidité relative supérieure à 40%. Pour expliquer le retrait du béton sous cette limite, d'autres mécanismes doivent être pris en compte.

➤ Variation de la tension superficielle

Dans une ambiance humide, les surfaces solides sont couvertes de plusieurs couches d'eau : c'est le phénomène d'adsorption.

La tension superficielle est reliée au départ de l'eau adsorbée. Lorsqu'il y a désorption, qui correspond à des humidités relatives faibles et un retrait à l'échelle macroscopique, l'énergie surfacique augmente. Cependant, à partir d'une certaine humidité relative, le solide subit une adsorption qui induisent une diminution de l'énergie surfacique. Donc, ce mécanisme fonctionne uniquement pour les faibles humidités relatives [Hua et al, 1995].

➤ Variation de la pression de disjonction.

L'eau associée à la pression de disjonction est en équilibre avec l'humidité relative environnante. Le départ d'eau entraîné par la diminution de l'humidité relative va engendrer

une diminution de l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée dans la zone d'adsorption empêchée et donc une réduction de la pression de disjonction. Cela conduit alors à une déformation du squelette solide correspond à la déformation de retrait.

IV.2.2. CAMPAGNE EXPERIMENTALE DU RETRAIT

La campagne expérimentale a comme objectif de mesurer, en fonction du temps, les variations dimensionnelles dues aux effets de l'hydratation et de la dessiccation des matériaux cimentaires. En s'appuyant sur l'influence de remplacement total des fillers calcaires par des fines recyclées sur le retrait total et endogène des bétons autoplaçants.

Les protocoles expérimentaux pour les essais de retrait endogène et total suivent les recommandations de la RILEM -TC 107-CSP Standardized Tests Methods for Creep and Shrinkage.

Les corps d'épreuve utilisés sont des prismes en béton autoplaçant de section carrée dont les dimensions sont 7x7x28 cm. Six éprouvettes sont effectuées pour chaque composition de BAP et conservées selon deux modes de conditionnement :

- Sans échange hydrique avec l'ambiance en enveloppant les éprouvettes instantanément après leur démoulage par un papier d'aluminium adhésif. Le retrait mesuré sur ces éprouvettes est endogène. La moyenne des mesures prises à chaque instant sur trois éprouvettes donne la courbe d'évolution du retrait endogène.
- Avec échange hydrique du matériau avec l'ambiance : le retrait total mesuré cumule le retrait endogène et le retrait de dessiccation. Dans ce cas aussi, la moyenne est faite sur les mesures prises sur trois éprouvettes afin d'obtenir l'évolution du retrait total.

Pour chaque béton, les mesures de retrait sont effectuées longitudinalement dans l'axe des éprouvettes, entre deux plots métalliques (figure IV.1a) qui serviront à les installer sur le rétractomètre (figure IV.1b) un appareil de mesure digital de précision de ± 0.003 mm. Les mesures sont effectuées à des termes très courts au départ, après démoulage, ensuite avec une périodicité qui augmente avec le temps. La durée de suivi dépasse les 150 jours dans une pièce de température $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et en humidité relative $55\% \pm 5\%$.

Les mesures du retrait sont accompagnées par des mesures de pesées sur une balance (précision de ± 0.1 g) afin de déterminer la dépendance entre la variation en poids et le retrait en mode de dessiccation de chaque composition.

Après chaque mesure, tous les prismes sont installés sur des panneaux dans une salle à environnement ambiant à $20 \pm 2\text{C}^\circ$ de température et une humidité relative de $55 \pm 5\%$. Elles sont arrangées de façon à ce que chacune d'elles soit éloignée des voisines d'au moins 2 cm, et qu'elle soit entourée d'air sur toutes ses côtés (figure IV.1c).

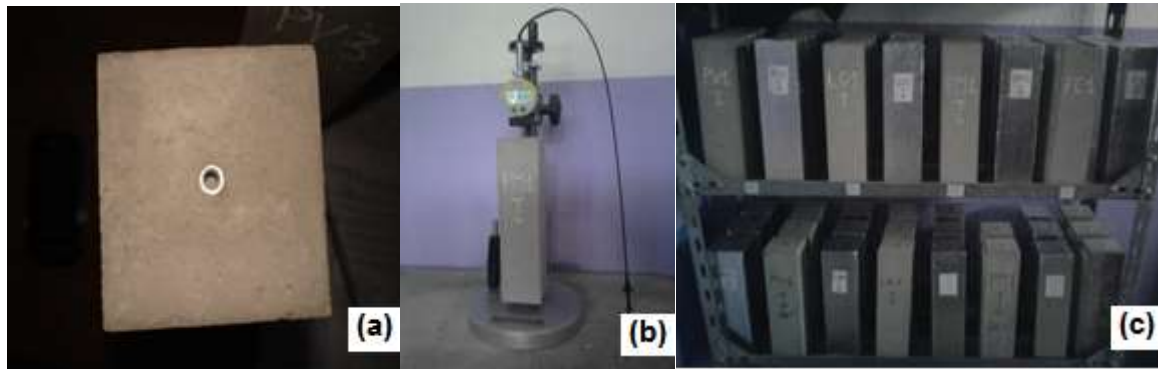


Photo IV. 1: (a) Positionnement des plots sur les éprouvettes de retrait (b) Appareil de mesure du retrait (Rétractomètre) (c) Conservation des éprouvettes de retrait

La formule de retrait s'interprète par la variation relative de longueur. Elle est généralement désignée par ε et calculé comme suite :

$$\varepsilon(t) = \frac{l(t) - l(t_0)}{l}$$

Ou

l la longueur de la tige étalon $l = 280$ mm.

$l(t)$ la longueur de l'éprouvette au temps t

$l(t_0)$ la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi pour origine. En général cette origine est prise au moment du démoulage, soit 24 h après la confection des éprouvettes.

Ces essais, effectués au LMDC, se sont déroulés selon un protocole précis et identique pour tous les essais de même nature.

IV.2.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Ce paragraphe synthétise les résultats de l'étude des comportements différées sans charge, retrait, des différentes compositions effectuées dont le paramètre de comparaison adopté étant la nature des fines recyclées à savoir la poudre de marbre, la poudre de verre et le laitier granulé.

Les différents retraits ont été mesurés jusqu'à 150 jours. C'est une période relativement courte, mais quand même, elle donne une bonne indication de l'influence de paramètre de l'étude sur le retrait hydrique. Les variations pondérales ont également été mesurées durant la phase de maturation à l'air libre et en mode endogène.

IV.2.3.1. RETRAIT TOTAL

La figure IV.3 présente les valeurs moyennes des évolutions des retraits totaux enregistrées en mode dessiccation jusqu'à 150 jours.

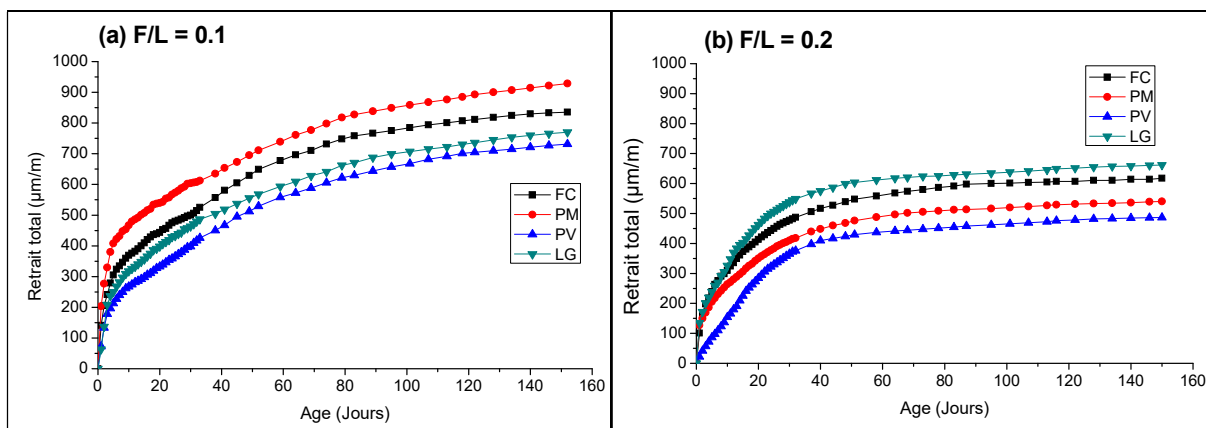


Figure IV. 3: L'évolution des déformations de retrait total.

La figure IV.3 illustre des déformations de retrait importantes qui sont caractérisées par la perte d'eau emmagasinée dans les pores capillaires du fait du très fort gradient d'humidité qui existe entre le matériau testé et le milieu extérieur [Benkechkeche et al, 2009]. Selon S. Assié [Assie, 2004] le retrait total est lié à la migration de l'eau à l'intérieur du matériau qui est en déséquilibre avec le milieu extérieur. Ce départ d'eau entraîne peu ou pas de retrait dans un premier temps car il s'agit de l'eau libre contenue dans des pores de grandes dimensions. En revanche, lorsque le séchage continue, l'eau qui s'évapore est plus fortement liée aux autres constituants de la matrice cimentaire et va donc générer une contraction du matériau.

D'après la figure IV.3, on note que les éprouvettes avec un rapport F/L = 0.2 ont subi un retrait total plus faible que ceux avec un rapport F/L = 0.1. Donc l'augmentation du dosage en fines recyclées diminue le retrait total des bétons autoplaçants.

L'augmentation du dosage en fillers calcaires n'a aucune influence sur le retrait total du béton autoplaçant au jeune âge. Mais à long terme, on constate une diminution de ce dernier. Contrairement à certains auteurs [Seng et al, 2005] qui considèrent que la teneur en fillers calcaires n'a aucune influence sur le retrait total si le même rapport eau / poudre est

maintenue. M. Meziani et al [Meziani et al, 2012] ont étudié l'influence des fillers calcaires et les micro-silices sur le retrait total des BAPs. Ils ont trouvé que les valeurs de retrait total allant jusqu'au 1744 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 150 jours ce qui est plus élevée que nos résultats. Par contre G. Benkechkeche et al [Benkechkeche et al, 2012] ont trouvé des valeurs de retrait total plus faible de l'ordre de 400 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 150 jours pour les BAPs à base des fillers calcaires. B. Boukni et al [Boukni et al, 2012] ont trouvé aussi des valeurs de retrait total proche que celles de G. Benkechkeche et al [Benkechkeche et al, 2012] de l'ordre de 600 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 150 jours. Ce qui est cohérent avec nos résultats.

Selon la figure IV.3 on constate qu'au jeune âge, le retrait total des BAPs à base de laitier granulé est pratiquement identique. Ce retrait est quasiment indépendant de la composition du béton ou du dosage en laitier granulé, l'effet des additions minérales n'apparaît qu'après la deuxième semaine avec une légère supériorité de 9% pour le BAP avec un rapport F/L = 0.2 par rapport à celui qui égale à 0.1. Mais à long terme il semble que l'augmentation du dosage en laitier granulé diminue le retrait total contrairement à H.W. Song et al [Song et al, 2001] qu'ils ont indiqué que le retrait peut être augmenté en augmentant la teneur de laitier granulé de haut fourneau. Concernant les mélanges à base de la poudre de verre on note que l'augmentation du rapport F/L de cette dernière entraîne une diminution du retrait total à long terme. La réduction du retrait total lors du séchage peut être attribuée en partie à la difficulté accrue de transport de l'humidité car l'hydratation et les réactions pouzzolaniques consomment plus d'eau libre et conduit à une structure plus fine des pores.

On remarque, d'après la figure IV.3a, que la poudre de verre génère un retrait total presque similaire à celui du laitier granulé. De plus on constate que ces derniers ont un retrait total plus faible que celui du béton témoin à base des fillers calcaires par un pourcentage de 14% et 11% respectivement. Par contre le BAP à base de la poudre de marbre représente un retrait total plus important que celui du béton témoin par un pourcentage de 7%. L. Jianyong et al [Jianyong et al, 2001] ont indiqué que le LG augmente considérablement la quantité d'hydrates et gel de C-S-H hydrates ainsi que la densité de la pâte de ciment durcie, ce qui rend le béton plus solide et plus résistant à la déformation.

Pour un rapport F/L = 0.2, représenté dans la figure IV.3b, on constate que les éprouvettes de la poudre de verre et la poudre de marbre ont les plus faibles valeurs du retrait total par rapport aux éprouvettes témoins à base des fillers calcaires. Par contre le remplacement des

fillers calcaires par le laitier augmente le retrait total du à la finesse plus faible de ce dernier par rapport aux fillers calcaires [Bensalem et al, 2014].

IV.2.3.2. RETRAIT ENDOGENE

Le retrait endogène est la déformation des bétons isolés sans échange hydrique avec le milieu extérieur. Ces valeurs témoignent les progrès de l'hydratation et l'auto-dessiccation due à la consommation de l'eau par le processus chimique de la formation des hydrates. La figure IV.4 présente les valeurs moyennes des évolutions des retraits endogènes enregistrées jusqu'à 150 jours.

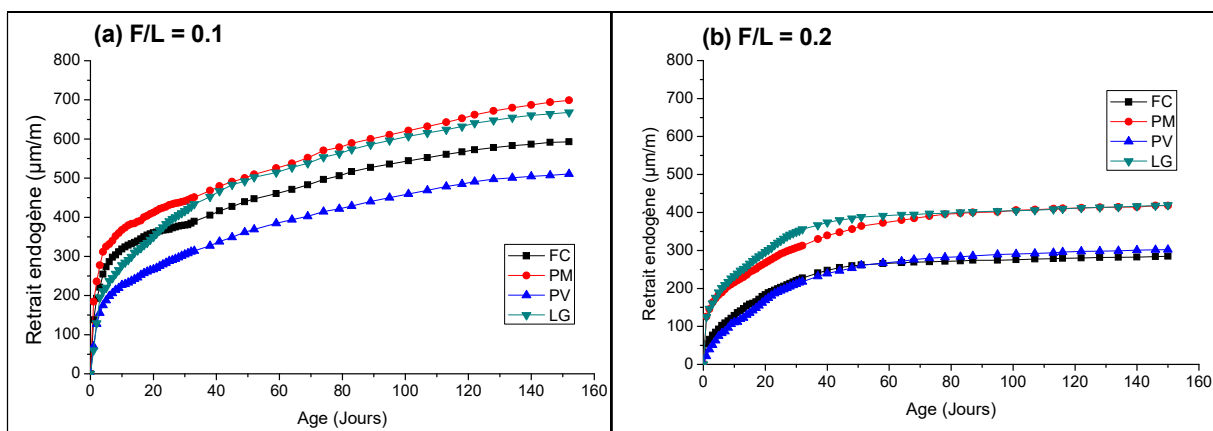


Figure IV. 4: L'évolution des déformations de retrait endogène.

Il est évident qu'à 150 jours, Figure IV.4, le retrait endogène des éprouvettes de LG et PM est plus élevé que celui de FC. Les fillers calcaires ont un effet favorable sur l'empêchement du retrait, comme le fait aussi son effet filler, ce qui contribue à diminuer le retrait endogène [Valcuende et al, 2012].

D'après la figure IV.4, on remarque que l'augmentation du rapport F/L engendre une diminution du retrait endogène. Cette diminution est plus prononcée pour les éprouvettes à base de fillers calcaires. Ce résultat est en cohérence avec ceux de la littérature [Rozière et al, 2005] où ils ont indiqué que l'utilisation de cendres volantes ou filler calcaire peut réduire à la fois le retrait endogène et de séchage.

L'effet du laitier sur l'hydratation est illustré sur la Figure IV.4 où l'évolution du retrait endogène montre un effet passif du laitier avant l'âge de 7 jours. Après 10 jours, l'effet du rapport F/L devient plus prononcé lorsque le laitier commence à réagir à cause de sa réactivité hydraulique libéré après la saturation de la solution interstitielle par la chaux. Les éprouvettes

avec un rapport F/L égale à 0.2 génère un retrait endogène largement inférieur témoignant d'un dosage en laitier plus élevée [Itim et al, 2011].

IV.2.3.3. RETRAIT DE DESSICCATION

Le retrait de dessiccation représente la déformation des échantillons de béton, en présence d'échange hydrique avec le milieu extérieur. Ces valeurs représentent la combinaison entre la dessiccation et la carbonatation qui témoigne la porosité de la microstructure et sa capacité à soutenir le séchage. Comme de nombreux auteurs l'ont souligné, ce retrait est déduit de la différence des retraits entre les échantillons libres et scellés. Toutefois, ce processus implique une petite erreur, qui peut être vu dans la figure IV.5 sous la forme d'une descente des courbes aux âges avancés. L'erreur est due au fait que, dans les échantillons non scellés l'auto-dessiccation est moins importante que dans les éprouvettes scellées, puisque lorsque l'humidité relative ambiante est plus élevée que celle dans le béton, une petite quantité de vapeur d'eau est absorbée par le béton, ce qui compense son auto-dessiccation [Valcuende et al, 2012]. Ce retrait peut être considéré comme dû uniquement à l'évaporation de l'eau contenue dans la pâte de ciment hydraté et qui se développe à partir des surfaces exposées à l'ambiance extérieure [Assié, 2005].

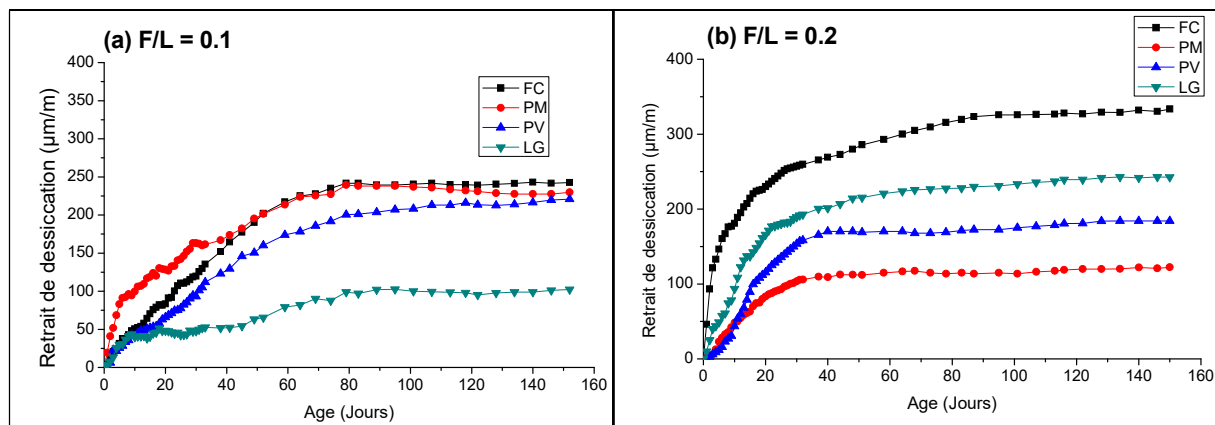


Figure IV. 5 : L'évolution des déformations de retrait de dessiccation

Pour toutes les éprouvettes, le taux de retrait au jeune âge est plus grand, les déformations de retrait à 28 jours sont d'environ 71% des valeurs maximales à 150 jours et la vitesse d'augmentation devient plus faible avec le temps. Comme les spécimens perdent de l'eau et s'approche de l'équilibre hygrométrique de l'atmosphère, le retrait de dessiccation ralentit et se stabilise.

Le retrait de dessiccation est connu d'augmenter avec le volume de la pâte [Bissonnette et al, 1999], [Roziere et al, 2007]. D'après la figure IV.5 on observe que l'augmentation du dosage en fillers calcaires et laitier granulé entraîne une augmentation de retrait de dessiccation. Cette observation est confirmée par certains auteurs [Chan et al, 2004], [Song et al, 2001] qu'ils ont déclaré que le retrait peut être augmenté en augmentant la teneur de laitier granulé de haut fourneau. Par contre, d'autres chercheurs [Rozière et al, 2005], [Gesoglu et al, 2009], [Güneyisi et al, 2010] ont déclaré que l'utilisation de cendres volantes ou filler calcaire peut réduire à la fois le retrait endogène et de séchage. En outre, E. Güneyisi et al [Güneyisi et al, 2010] ont constaté que retrait de dessiccation diminué avec l'utilisation des cendres volantes, laitiers granulé, et metakaolin tandis que l'incorporation de fumé de silice a augmenté le retrait de dessiccation. Ces effets semblent être plus prononcés avec l'augmentation du taux de remplacement des additions minérales. Les mêmes constatations ont été trouvées par M. Gesoglu et al [Gesoglu et al, 2009]. Selon la figure IV.5 on note que l'augmentation du dosage en poudre de marbre et poudre de verre entraîne une diminution du retrait de dessiccation. C. Shi et al [Shi et al, 2005b] ont rapporté que le retrait de dessiccation diminue avec une augmentation de la finesse de la poudre de verre.

Le remplacement des fillers calcaires par des fines recyclées diminue le retrait de dessiccation cette diminution est plus prononcée à un rapport F/L égale à 0.2. Le retrait de dessiccation est réduit significativement lors du remplacement des fillers calcaires par le laitier granulé. Cette réduction est plus évidente après la première semaine, figure IV.5a, lorsque la réaction hydraulique latente commence à prendre effet. Cela est dû à la qualité de la microstructure et de la finesse des pores qui empêche l'évaporation de l'eau [Itim et al, 2011]. De plus, on constate que le remplacement des fillers calcaires par la poudre de verre diminue le retrait de dessiccation car la poudre de verre contribue par sa finesse et sa réaction pouzzolanique à cette diminution.

IV.2.3.4. LA PERTE EN POIDS

Les différents résultats obtenus pour des échantillons de différentes compositions et mode de conservation indiquent clairement qu'en termes d'amplitude et de cinétique, qu'en premier temps, la cinétique de la variation de la perte en poids croit rapidement dans 5 ± 1 jours et après cette tolérance en observant une diminution de la cinétique. P. Turcry [Turcry, 2004] a expliqué que le séchage est toujours accompagné de la perte de masse du matériau. Selon A. Kamen [Kamen, 2007] la perte de masse relativement élevée aux jeunes âges est due à la dessiccation élevée, pendant ces premiers moments, les réactions de l'hydratation sont très

actives. Avec l'avancement du processus de l'hydratation et le départ de l'eau vers le milieu extérieur (évaporation de l'eau causée par la chaleur de l'hydratation), les matériaux se dessèchent de plus en plus avec une vitesse relativement réduite due au confinement des pores. Au-delà de 90 jours, une légère augmentation de la masse des bétons est signalée et qui est due à l'échange de l'eau avec l'extérieur. Les résultats des variations pondérales obtenus à 150 jours sont représentés dans la figure IV.6.

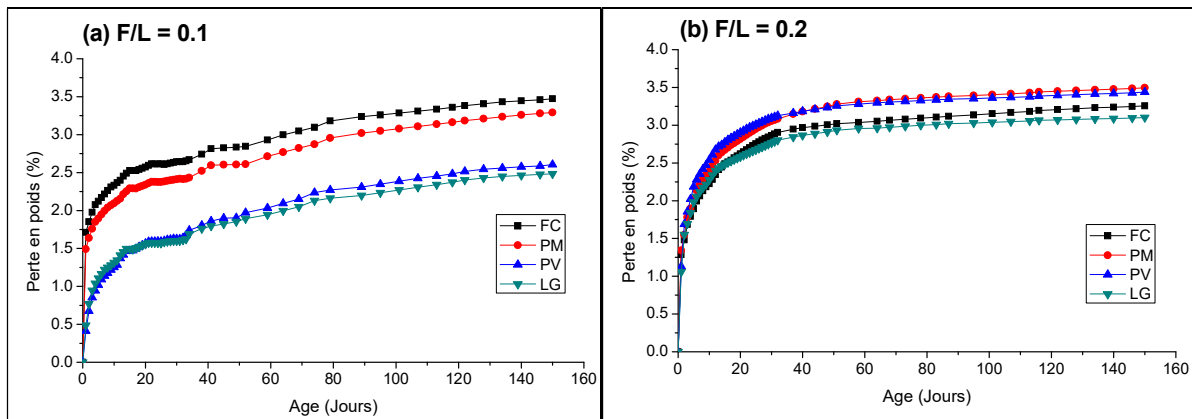


Figure IV. 6: L'évolution de la perte en poids des BAPs.

D'après la figure IV.6a on constate que, à un rapport $F/L = 0.1$, l'évaporation d'eau dans les éprouvettes de FC est plus rapide que celle du PV et LG et avec une similarité relative au PM (une différence de 6%). Notons que les éprouvettes de PV et de LG présente des valeurs plus faible que celles du FC par un pourcentage de l'ordre de 29 % et 32% respectivement.

Pour un rapport $F/L = 0.2$, les éprouvettes de PM et PV présentent une perte en poids un peu plus élevée que celle du béton témoin à base des fillers calcaires contrairement au LG. Cela est dû principalement à leur finesse, mettant en évidence la diminution des pores capillaires [Bensalem et al, 2014]. Les pores capillaires influencent fortement les propriétés de transfert du béton, en particulier lorsqu'ils sont interconnectés. Donc, en conclusion, la finesse est un facteur majeur pour ce genre de démonstration. De plus, la nature des fines semble d'avoir un effet d'influence [Nepomuceno et al, 2012]. On note que l'augmentation du rapport F/L de la poudre de verre ou le laitier granulé engendre une augmentation de la perte en poids. Par contre l'ajout des fillers calcaires entraine une diminution de cette dernière.

La valeur maximale de la perte en poids totale enregistrée est de l'ordre de 3,5% et nos résultats sont similaires à ceux trouve dans la littérature [Meziani et al, 2012], [Boukni, 2012]. Ainsi les prismes de retrait endogène ont été pesés pour examiner l'imperméabilité de la protection et on a constaté une variation de masse varie entre 0,07 et 0,15 % à 150 jours.

IV.2.3.5. RELATION RETRAIT – PERTE EN POIDS

L'évolution du retrait en fonction de la perte en poids pour les différentes compositions, est reportée sur la figure IV.7.

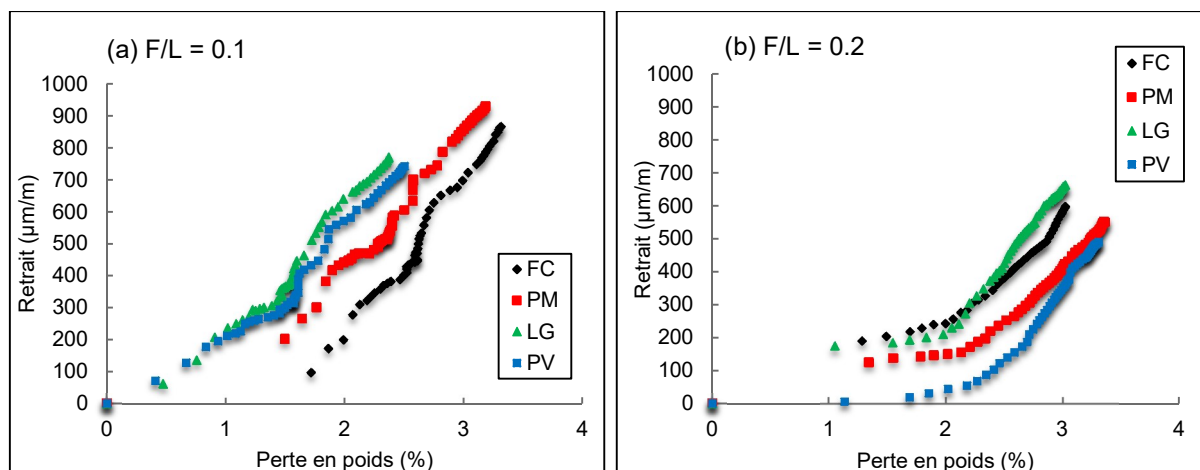


Figure IV. 7: L'évolution de retrait total des BAPs en fonction de la perte en poids.

D'après la figure IV.7 on constate que l'évolution de retrait total des BAPs en fonction de la perte en poids s'illustre en deux phases. La première est la phase dormante ou la perte de masse n'engendre quasiment pas de retrait. Cette phase, courte dans le temps, est associée à l'évaporation de l'eau des pores les plus larges à la périphérie de l'éprouvette couplée à une microfissuration surfacique induite qui s'oppose à la contraction du prisme [Khelidj et al, 1998]. La deuxième c'est la phase où le retrait est proportionnel à la perte en masse avec un développement rapide après les cinq premiers jours. Dans cette phase la contraction du squelette solide est provoquée principalement par la dépression capillaire [Turcry, 2004].

Tous les bétons ont atteint la dernière phase à savoir la phase de stabilité où le retrait dépasse 80% de la valeur finale.

On remarque d'après la figure IV.7 que la perte de masse nécessaire pour amorcer le retrait varie selon la nature et le dosage des fines recyclées. Car la perte de masse nécessaire pour entamer le retrait des éprouvettes de FC est plus élevée que celle de LG et PV et presque similaire à celle de PM. On note aussi que le retrait total des éprouvettes contenant de PV ou LG avec un rapport F/L de 0.1 intervient pour une perte de masse plus faible que celle avec un rapport F/L supérieur. Au cours de la deuxième phase, le développement du retrait est beaucoup plus progressif pour les BAPs contenant du laitier granulé.

IV.2.3.6. CONFRONTATIONS DES RESULTATS DE RETRAIT AVEC LES CODES

Parmi les modèles de prédiction de contrainte en fonction du temps existants mentionnés ci-dessus (modèle B3, JSCE-2002, ACI-209, MC 2010 et EC2), seulement les résultats du modèle EC2 (Euro-code 2) sont présentées dans la discussion de ce travail. Le modèle EC 2 utilise uniquement des paramètres qui sont bien connus pour le concepteur, à savoir, la résistance à la compression, la géométrie, RH de l'environnement exposé, l'âge de démoulage et le type de ciment pour prédire le fluage et l'évolution de retrait en fonction du temps. Les étapes de calcul des valeurs théoriques sont détaillées dans l'Annexe B. Le tableau IV.1 représente la comparaison entre les résultats expérimentaux (Exp) et théoriques (EC 2) du retrait total après 150 jours.

Tableau IV. 1 : Confrontation des résultats expérimentaux de retrait total avec l'Eurocode 2.

	F/L = 0.1				F/L = 0.2			
	FC	PM	PV	LG	FC	PM	PV	LG
Exp	865.48	928.57	741.67	770.24	617.86	550	490.47	661.9
EC2	436.45	435.52	438.35	401.69	480.86	481.3	446.1	409.99

D'après le tableau IV.1, on constate que les déformations développées sont toujours supérieures à celles prédites par l'Eurocode 2, donc on peut dire que ce modèle sous-estime les valeurs réelles du retrait total. Par conséquent, il faut être conscient que les modèles disponibles dans la littérature pour prédire le fluage et le retrait ont été développés principalement basée sur des tests effectués sur des bétons ordinaires [Gardner et al, 1993]. En outre, ces modèles ne tiennent pas compte l'effet de la composition du mélange nécessaire pour produire un BAP tel que la nature des additions minérales.

IV.2.4. BILAN

Cette partie de l'étude a pour but d'évaluer l'influence du remplaceant total des fillers calcaires par des fines recyclées sur le retrait, endogène et total, des bétons autoplaçants dont le développement industriel connaît actuellement un grand essor. Les résultats obtenus sont les suivant :

L'augmentation du rapport F/L (la teneur en fines recyclées) entraîne une diminution du retrait total et endogène. Cependant, l'augmentation du dosage en fillers calcaires, poudre de

verre et laitier granulé augmente le retrait de dessiccation. Par contre, l'ajout de la poudre de marbre entraîne une diminution de ce dernier.

Le remplacement total des fillers calcaires par la poudre de verre diminue le retrait total des bétons autoplaçants. De plus, les mélanges à base de la poudre de verre ont les plus faibles valeurs du retrait total par rapport aux autres mélanges.

Concernant le retrait endogène, le remplacement total des fillers calcaires par la poudre de marbre et le laitier granulé augmente le retrait endogène des bétons autoplaçants. Par contre les mélanges contenant de la poudre de verre ont subi un retrait endogène plus faible que celui des fillers calcaires.

Pour le retrait de dessiccation, on peut dire que son l'amplitude diminue on remplaçant les fillers calcaires par des fines recyclées locales.

La valeur maximale de la perte en poids totale enregistrée est de l'ordre de 3,5%. L'augmentation du rapport F/L des mélanges en poudre de verre ou laitier granulé (des ajouts de nature pouzzolanique et hydraulique latent respectivement) engendre une augmentation de la perte en poids. Par contre l'ajout des fillers calcaires entraîne une diminution de cette dernière.

IV.3. ETUDE DE COMPORTEMENT DIFFERE EN FLEXION QUATRE POINTS

IV.3.1. GENERALITES SUR LE PHENOMENE DE FLUAGE

Le fluage du béton, résultant d'une charge maintenue constante, est une augmentation progressive des déformations au cours du temps.

Un élément en béton soumis à une sollicitation présente deux types de réponse :

- Une déformation élastique instantanée au moment du chargement.
- Une déformation différée

C'est une déformation qui s'ajoutant directement à la déformation instantanée, et dont sa cinétique diminue avec le temps. La déformation de fluage du béton sous charge stationnaire peut être plusieurs fois plus grande que la déformation élastique instantanée. L'amplitude dépend principalement de l'échéance du béton au moment du chargement.

Tout comme pour le retrait libre, le fluage est décomposé en un fluage endogène et fluage de dessiccation. Cette décomposition est liée à la différence en humidité relative de l'ambiance de conservation.

IV.3.1.1. MECANISMES DE FLUAGE ENDOGENE

Le fluage propre ou endogène est défini comme la déformation mesurée sur un élément en béton soumis à une contrainte appliquée, sans échange hydrique avec le milieu extérieur. Son amplitude est reliée à la quantité d'eau libre présente au sein du béton au moment du chargement. Moins il y a d'eau libre, moins le matériau flue. Cette tendance est confirmée par l'étude de P. Acker et al [Acker et al, 2001].

Dans la pratique, la composante relative à la déformation de fluage propre est déduite en soustrayant la déformation du retrait endogène et la déformation élastique instantanée de la déformation totale mesurée sous chargement. Cette décomposition est purement conventionnelle car elle néglige les interactions sous-jacentes entre retrait endogène et fluage [Ulm et al, 1999] [Sellier et al, 2009]. [Ladaoui, 2010].

L'analyse de la cinétique du fluage propre des bétons a met en évidence deux régimes de cinétiques différentes [Ruetz, 1968] ; [Ulm et al, 1998] à savoir :

- *Fluage propre à court terme* caractérisé par une cinétique rapide dans les premiers jours après le chargement.
- *Fluage propre à long terme* caractérisé par une cinétique plus lente qui tend à se stabiliser avec le temps.

➤ FLUAGE PROPRE A COURT TERME

On distingue dans la littérature plusieurs théories pour expliquer le mécanisme du fluage propre du béton à court terme. Nous pouvons notamment citer la théorie de suintement, la théorie de cisaillement visqueux, la théorie d'activation d'énergie, l'hydratation sous contrainte et la théorie de solidification [Tamtzia et al, 2000]; [Benboudjema, 2002]; [Berthollet, 2003]. Ces différentes théories s'accordent sur la diffusion de l'eau induite par l'application de la charge.

L'application d'un chargement extérieur amorce un mécanisme diffusif de l'eau au sein du matériau (l'espace capillaire) [Wittmann, 1982], causé par le déséquilibre thermodynamique à l'échelle microscopique. Pour restituer l'équilibre, un transfert de molécules d'eau se met

en place entre l'eau en adsorption libre et celle de la porosité capillaire (Figure IV.8). Ce transfert produit une déformation du squelette entraînant un mécanisme de fluage propre.

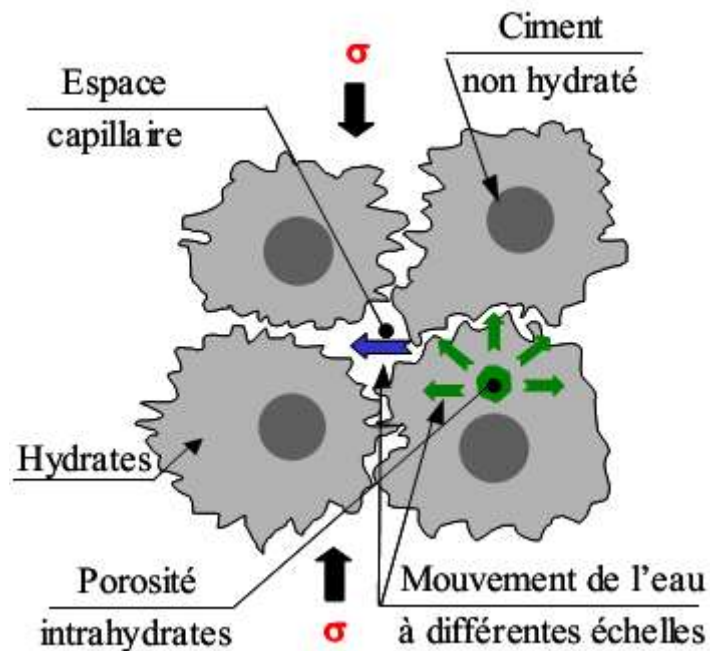


Figure IV. 8: Mécanismes du fluage propre à court terme [Ulm et al, 1999]

Par la suite, le fluage propre va continuer de se manifester à long terme avec d'autres mécanismes présentés dans le paragraphe suivant.

➤ FLUAGE PROPRE A LONG TERME

Un élément en béton est soumis à un fluage propre à long terme, lorsqu'il est placé sous contrainte constante pendant une longue période sans subir de déséquilibre hydrique avec son environnement.

A long terme, la nature vieillissant du matériau a un effet important sur l'amplitude de la déformation de fluage propre.

Avec le temps, les déformations causées par la charge appliquée engendrent un déséquilibre des micro-précontraintes au niveau des zones d'adsorption empêchée. La cohésion des CSH en est alors affectée et des glissements de feuillets de CSH se manifestent (figure IV.9). Ces glissements permettent d'épuiser les sites de fluage induits par le chargement mécanique. Cet épuisement conduit à une diminution considérable de la cinétique du fluage propre à long terme du béton [Bažant et al, 1997a].

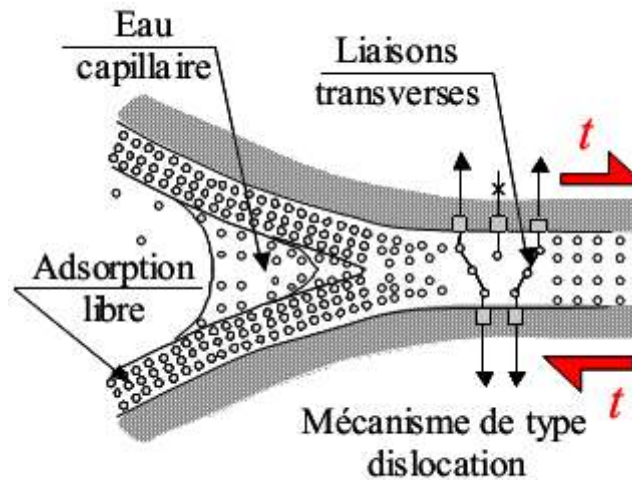


Figure IV. 9: Mécanismes du fluage propre à long terme [Ulm et al, 1999].

IV.3.1.2. MECANISMES DE FLUAGE DE DESSICCATION

La tendance observée, dans le cas du fluage propre, relie hygrométrie du béton chargée (la quantité d'eau libre) à l'amplitude du fluage : une éprouvette pré-séchée, de façon uniforme, flue moins qu'une éprouvette saturée. Cependant, si le béton subit un séchage simultanément avec l'application de la charge (essai fluage total), l'amplitude du fluage augmente avec la diminution de l'hygrométrie. Ce phénomène est nommé «effet Pickett » selon le chercheur qui a démontré a mis en évidence expérimentalement ce comportement [Pickett, 1942].

Les phénomènes sources du fluage de dessiccation sont également nombreux et divers [Granger, 1996]. Toutefois, deux phénomènes phares semblent se dégager de la littérature pour l'expliquer : le premier est un effet structural induit par la cinétique de séchage et le second est un effet intrinsèque au matériau.

➤ FLUAGE DE DESSICCATION STRUCTURAL

Comme vu lors de l'étude du retrait de dessiccation, une éprouvette de béton non charge soumis au séchage subit un déséquilibre hydrique qui provoque un gradient de contrainte entraînant des compressions au cœur et des tractions au voisinage de surface. Ces tractions en surface peuvent conduire à une microfissuration en peau et donc l'effet du retrait ne peut plus être transmis au cœur.

Cependant, lorsqu'on applique un chargement de compression l'état de contrainte résultant est illustré par la Figure IV.10. On peut constater que la présence du chargement implique, si sa

valeur est suffisante, qu'il n'y ait plus de traction en surface de l'éprouvette l'effet du retrait est transmis au cœur de l'éprouvette qui se contracte [Ollivier et al, 2008].

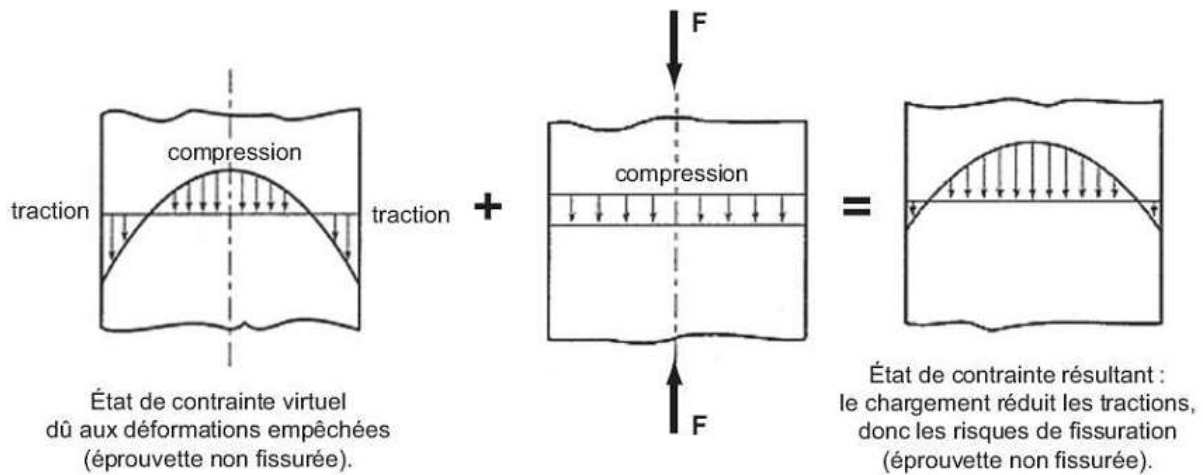


Figure IV. 10: Effet d'un chargement sur un béton en dessiccation [Pons, 1998].

Le relâchement des autocontraintes par fissuration, observé sur l'éprouvette non chargée, n'est plus valable et la totalité du retrait de dessiccation peut se développer [Ollivier et al, 2008]. De plus, la fissuration due au séchage d'une éprouvette chargée est moins accentuée que celle d'une éprouvette sans chargement [Wittmann, 1982]. Aussi, la déformation mesurée lors d'un essai de fluage de dessiccation est supérieure à la somme du retrait de dessiccation et de la déformation de fluage propre. La différence correspond à la déformation engendrée par l'effet structurel [Benboudjema, 2002].

➤ FLUAGE DE DESSICCATION INTRINSEQUE

L'effet structural du retrait de dessiccation ne permet pas de justifier à lui seul la totalité de la déformation du fluage de dessiccation mesurée [Bažant et al, 1997b]; [Granger et al, 1996]; [Benboudjema, 2002]. C'est la raison pour laquelle on doit considérer l'existence d'une part supplémentaire intrinsèque du fluage de dessiccation en plus de la part structurale.

La part intrinsèque du fluage de dessiccation est expliquée par plusieurs théories, tel que celle de consolidation [Ruetz, 1968], le concept de la relaxation des micro-précontraintes dans les zones d'adsorption empêchée [Bažant et al, 1997b], la théorie de la variation du rayon de courbure des ménisques et celle de la concentration de contraintes sur les CSH [Brooks, 2001a], [Benboudjema, 2002].

Les principales idées proposées sont l'augmentation de la dépression capillaire, la migration de CSH par arrachement et la redistribution locale de la contrainte. Les causes probables sont

soit les variations de pression capillaire, soit celles de la pression de disjonction dans les zones d'adsorption empêchée ou encore la diffusion de l'eau aux échelles macro et microscopiques [Brue, 2009]. Le fluage est un phénomène fortement dépendant de la maturité du béton [Turcry, 2004].

IV.3.2. CAMPAGNE EXPERIMENTALE DU FLUAGE EN FLEXION 4 POINT

Dans cette recherche, une étude expérimentale du fluage flexionnel des bétons autoplaçants sous deux modes de conditionnement (endogène et de dessiccation) a été menée, en se basant sur l'influence du remplacement total des fillers calcaires par des fines recyclées de nature différente. Avant le lancement de la campagne de fluage flexionnel, de nombreux essais préliminaires ont eu lieu, afin d'estimer le chargement à appliquer, ou encore afin de fixer le protocole d'essai.

➤ *DETERMINATION DE LA CHARGE DE RUPTURE*

Par analogie aux travaux antérieurs, dans le même domaine d'intérêt, la contrainte maintenue constante (ou en charge) a été fixée à 1,30 MPa, pour rester dans les plages de comparaison. Il est indispensable de connaître les charges de rupture de chaque composition afin de pouvoir estimer son taux. Des essais ont été réalisés, à l'âge de 7 jours, sur des poutrelles de même géométrie que celles testées en fluage (10x10x120cm). Les dimensions des poutres ont été choisies de manière à faciliter la manipulation des spécimens et en fonction des moules disponibles, tout en ayant des proportions (L/h et b/h) près de la réalité.

Les essais ont été réalisés sur une presse de force d'une capacité maximale 3000 KN. Le dispositif d'essais (Photo IV.2 - Figure IV.11) est constitué d'un vérin équipé d'un palonnier assurant la répartition de l'effort total appliqué en deux points de chargement symétrique par rapport à l'axe de poutrelle. La poutrelle repose à ses extrémités sur deux appuis rotules, dont l'un est translatable pour éviter la mise en jeu d'un effort normale parasite dès que les flèches prennent des valeurs significatives.

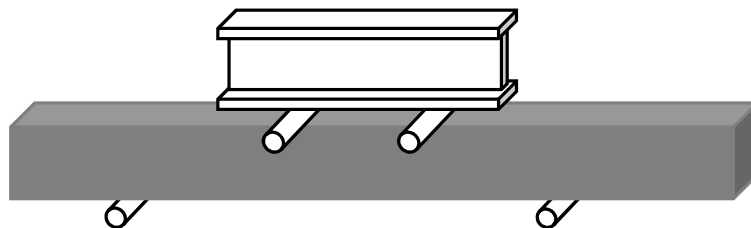


Figure IV. 11: Poutrelle utilisée pour l'étude de comportement des mélanges en flexion



Photo IV. 2: Mesures de la charge de rupture.

La charge est appliquée de façon monotone croissante jusqu'à la ruine de l'élément. Le pilotage de vérin est réalisé par régulation en mode force, le chargement est appliqué par palier de 10KN. La distance entre les appuis est de 100 cm pour n'être influencées que par leurs poids propres, l'origine de toutes les mesures sera cette position initiale de l'élément.

Cet essai a été choisi parce que le mode de chargement permet d'éliminer toute contrainte de cisaillement dans la zone centrale, en y conservant un moment fléchissant constant ; par ailleurs suivant C.D. Johnston [Johnston, 1982] cité par M. Bentalha, [Bentalha, 2007]), la flexion quatre points donne des résultats moins dispersés que la flexion trois points.

Le tableau IV.2 regroupe les résultats des mesures des charges de rupture pour les différentes poutrelles en BAP soumises à un chargement statique en flexion quatre points. Les résultats ont été enregistrés comme la moyenne des trois échantillons.

Tableau IV. 2: Charge de rupture en flexion à 7 jours en KN.

BAP	FC	PM	LG	PV
F/L = 0.1	4.60	4.50	4.20	5.05
F/L = 0.2	4.33	4.40	4.10	4.41

On remarque, d'après le tableau IV.2, que la charge de rupture varie selon la nature des fines recyclées, les bétons autoplaçants à base de la poudre de verre présentent des charges de rupture plus élevées par rapport aux autres mélanges. Les bétons avec un rapport F/L élevé (un dosage en ajout important) présentent des faibles charges de rupture mais fiables.

➤ **PROCEDURE EXPERIMENTALE**

Les corps d'épreuve choisis sont des poutrelles en béton autoplaçant de section carrée dont les dimensions sont de 10x10x120 cm. Elles sont confectionnées à partir des mêmes constituants provenant du même lot de fabrication. Dans cette étude, la séparation entre le fluage endogène et de dessiccation est prise en compte (Photo IV.3).



Photo IV. 3: Eprouvette scellée et non scellée.

Pour chaque béton testé, des séries de poutrelles sont confectionnées. Après démoulage à 24 heures, la moitié des poutrelles, préalablement rectifiées, sont totalement scellés par du papier aluminium adhésif. Et le reste des éprouvettes ne sont pas protégées. Les premières servent à déterminer le fluage endogène et les secondes le fluage total.

Tous les poutrelles sont entreposées dans une salle à une température et humidité relative maintenue ($25 \pm 2^\circ\text{C}$ et $55 \pm 5\%$ respectivement) jusqu'à l'âge de chargement à 7 jours. La charge dans tous les essais de fluage en flexion quatre points est maintenue constante à 1,3 MPa qui représente 30% de la charge de rupture du BAP témoin à base des fillers calcaires au moment du chargement. La durée de chargement est supérieure à 200 jours.

➤ **DISPOSITIF DE FLUAGE EN FLEXION QUATRE POINTS**

Les essais de fluage flexionnel sont effectués sur un système en portique comme le montre la photo IV.4. C'est un prototype qui a été réalisé, au sien du réseau de laboratoire de LMDC à l'université Mentouri Constantine [Houari, 1993],[Chabane, 2008],[Benkechkeche, 2012].

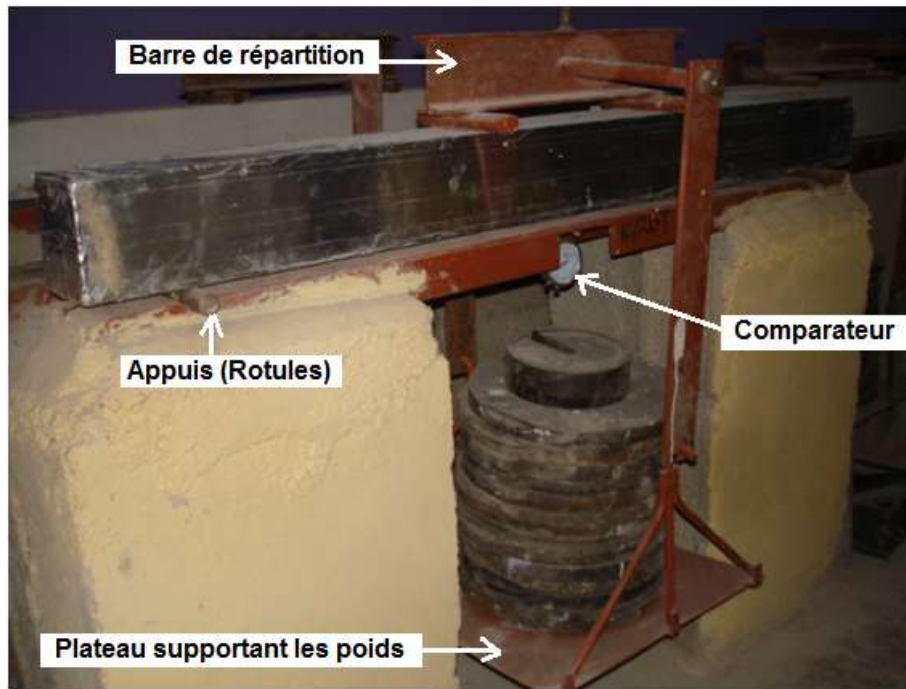


Photo IV. 4: le bâti de fluage [Bensalem et al, 2016].

Le bâti comporte un système de chargement manuel, cette mise en charge est réalisée à l'aide d'un support qui prend appui sur la partie supérieure du bâti d'essai par l'intermédiaire d'une barre rigide de répartition d'effort. Cette barre rigide est sous forme de palonnier assurant la répartition de l'effort total appliqué en deux points de chargement symétrique par rapport à l'axe de la poutrelle. Deux efforts égaux sont transmis par le biais de rouleaux (Barre de fer en rond lisse de diamètre 20 mm) fixés sur la barre.

Le poids du système de mise en charge est de 10 kg qui sera prise comme la première charge appliquée sur la poutrelle. Cette dernière repose sur deux appuis simples constitués de deux rotules sous forme de rouleaux en acier. Ces derniers prennent place sur des rainures réalisées sur une poutre en UAP 100 qui prend appui sur deux potelets (jambages). Un système de fixation est soudé sous et au centre de la poutre UAP avec un petit trou laissant passer la tige du comparateur.

La mise en charge d'une poutrelle est réalisée après avoir centré géométriquement cette dernière entre les appuis et effectuer les mesures de référence.

Pour les poutrelles de fluage, le chargement est quasi-instantané. Le plateau sur lequel reposent les masses est isolé du bâti par un support qui soutient ce plateau. Donc, toutes les masses nécessaires à l'essai de fluage peuvent être empilées sans perturber l'éprouvette déjà

mise en place. En outre, Il est nécessaire que la durée de mise en charge ne dépasse pas les cinq minutes afin de réduire au maximum le début de fluage.

La mesure de la flèche se fait entre les deux points de chargement, dans la zone de moment constant, au milieu de la poutrelle par un comparateur (précision 0,001 mm) qui enregistre la flèche totale regroupant le déplacement instantané dû à l'application de la charge, le fluage et le retrait. Cette flèche est mesurée à un intervalle régulier de manière manuelle.

IV.3.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les évolutions des différentes déformations sous charge sont présentées dans cette partie. Les essais relatifs à ces déformations sous charge de flexion quatre points sont effectués sur 3 poutrelles pour chaque formulation.

Lorsqu'une contrainte est appliquée sur un matériau, la déformation causée par ce dernier est divisée en deux parties, à savoir :

- une déformation instantanée au moment du chargement, élastique, qui survient immédiatement.
- une déformation différée, fluage, s'ajoutant à la déformation instantanée et dont la vitesse diminue avec le temps.

IV.3.3.1. DEFORMATION INSTANTANEE

La déformation initiale développée pendant le chargement est liée à la déformation élastique, ce qui signifie que la déformation plastique qui se déroule pendant le chargement doit être considérée comme déformation de fluage [Maia et al, 2012]

Les déformations instantanées élastiques qui ont lieu au moment du chargement des éprouvettes sont représentées dans la figure IV.12. Chaque résultat de déformation résulte de trois mesures données par trois essais sur trois poutrelles de même composition.

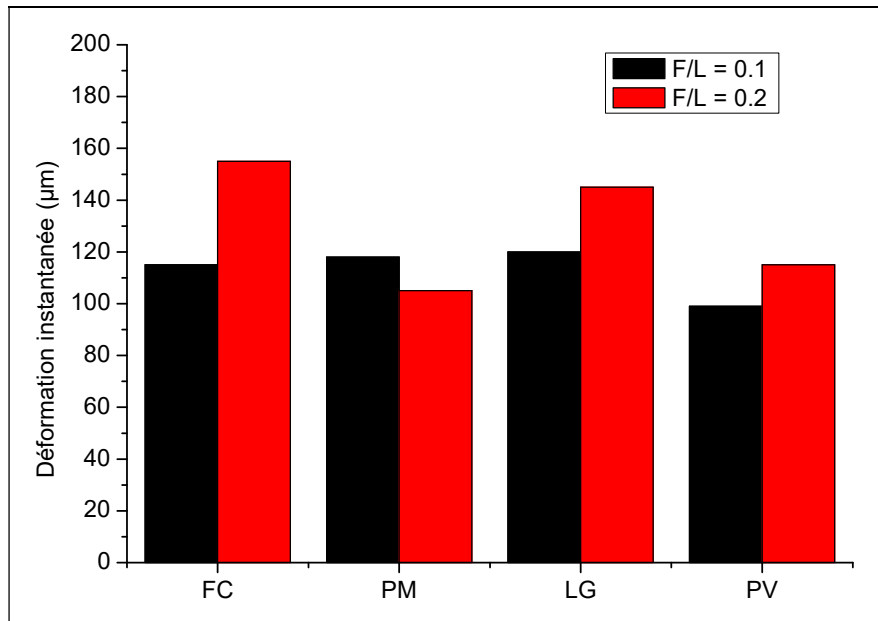


Figure IV. 12 : Les déformations instantanées sous charge constante.

D'après la figure IV.12 on constate que l'augmentation du dosage en ajout minéral accroît les déformations instantanées sauf pour le mélange contenant de la poudre de marbre ou on observe une diminution des déformations instantanées par un pourcentage de 11%. Le taux d'augmentation des déformations instantanées se diffère d'une fine recyclée à l'autre. Il est de l'ordre de 34%, 21% et 16% pour les poutrelles à base de FC, LG et PV respectivement.

Les résultats indiquent que le béton ayant une résistance à la flexion à quatre points plus élevée, le jour du chargement, révèle moins de déformation instantanée [Bensalem et al, 2016]. A titre d'exemple, le BAP PV, qui a les plus faibles déformations instantanées, est celui qui a la meilleure résistance à la flexion à quatre points à 7 jours, comme le montre le tableau IV.2. En d'autre terme, en rapport charge appliquée/résistance, les poutrelles de PV sont les moins sollicitées puisque la charge appliquée est la meme pour toutes les poutrelles.

IV.3.3.2. DEFORMATION DIFFEREE

Un spécimen de béton mis en charge est en conséquence sujet à de nombreuses déformations différées au cours du temps, du retrait, qu'il subit dès le démoulage et tout au long de sa durée de vie, auquel s'additionnent les déformations dues au chargement, qui se décomposent en une déformation élastique instantanée au moment du chargement et une déformation viscoélastique en fonction du temps de chargement [Assié, 2004]. Dans ce travail la contrainte du chargement et la déformation de retrait ne sont pas considérées comme des phénomènes indépendants. Donc, dans tous les cas les déformations mesurées correspondent aux

phénomènes de fluage et retrait. Les résultats seront présentés en termes de déformations différées, où seules les déformations élastiques instantanées seront retranchées.

Les tests liés à ces déformations sous charge stationnaire sont accomplis sur 3 poutrelles pour chaque composition sous distincts modes de conditionnement (scellé et non scellé). La charge appliquée est fixé à 1.2 KN (30% de la charge de rupture de béton témoin BAP-FC au moment du chargement à savoir 7 jours).

➤ **FLUAGE ENDOGENE**

La figure IV.13 présente l'évolution des déformations de fluage flexionnel endogène.

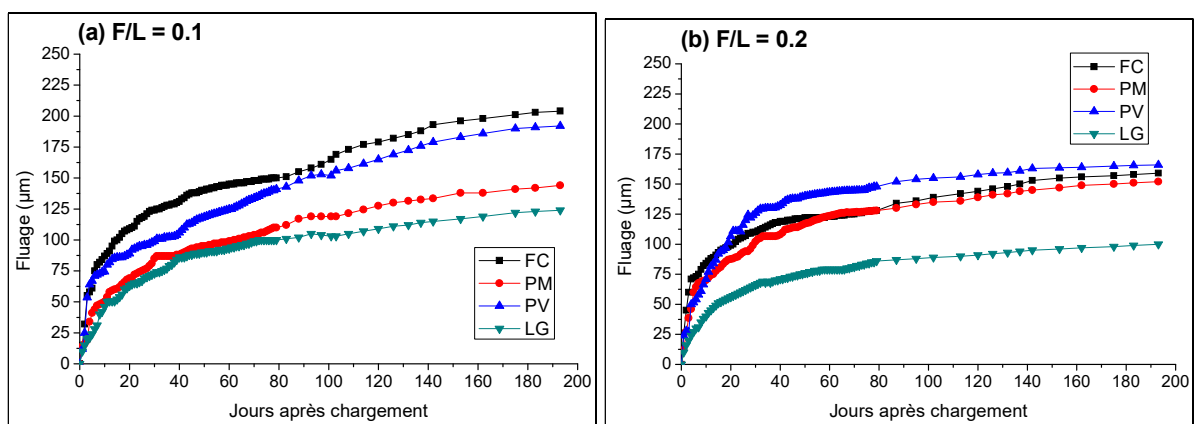


Figure IV. 13: Evolution des déformations de fluage endogène des BAPs.

D'après la figure IV.13a, on constate que l'ordre de grandeur du fluage endogène de BAP témoin à base des fillers calcaires est le plus grand. Quant à un rapport $F/L = 0.2$, figure IV.13b, on note que le remplacement total des fillers calcaires par la poudre de verre entraîne une légère augmentation de fluage endogène. Donc, on peut dire que le remplacement des fillers calcaires par des fines recyclées réduit les déformations endogènes mais cette réduction diminue en augmentant le rapport F/L .

Plusieurs études [Wittman, 1982], [Acker et al, 2001] ont proposé des théories pour expliquer le mécanisme du fluage. Le fluage à court terme durant les premiers jours de chargement serait provoqué par l'eau libre qui, sous contrainte constante suffisamment élevée, sera transféré par micro diffusion vers les pores capillaires de moindre pression, provoquant des déformations supplémentaires. Si on se réfère à cette explication, les pores du BAP-FC et BAP-PV seraient plus connectés entre eux, au jeune âge, ce qui faciliterait les mouvements d'eau libre. Ces bétons développeraient ainsi des déformations différées supérieures au jeune âge. À long terme, les déformations de fluage, causées par la charge appliquée, seraient dues à la

cohésion des CSH, dont des glissements des feuillets se manifeste sous l'effet de la micro diffusion de l'eau interstitielle [Bazant et al, 1997]. Les évolutions des déformations différées se diffèrent en fonction de la quantité et probablement la morphologie des CSH différentes selon la nature de l'ajout minéral.

➤ FLUAGE TOTAL

Il s'agit du fluage additionnel qui se produit en plus du fluage endogène lorsque l'élément en béton soumis à une contrainte appliquée est exposé à des conditions de séchage. La somme du fluage endogène et du fluage de dessiccation donne le fluage total. La figure IV. 14 illustre les résultats de fluage total selon la nature des fines recyclées.

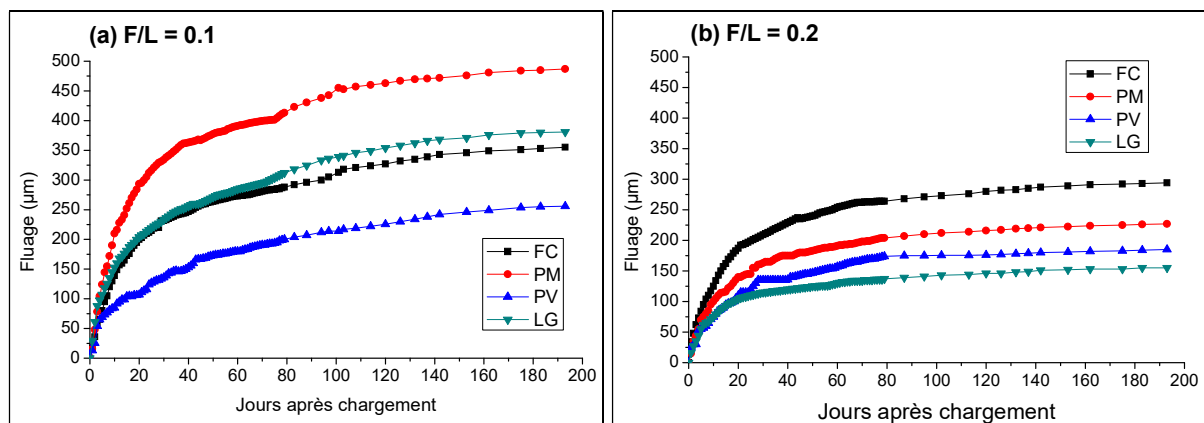


Figure IV. 14: Evolution des déformations de fluage total des BAPs.

Malgré une échéance de mesure faible, les déformations semblent s'être stabilisées à 80 jours. Les résultats de fluage total des poutrelles témoins à base des fillers calcaires sont en cohérence à ceux trouvées dans la littérature [Benkechkeche, 2009].

Pour un rapport F/L = 0.1, Figure IV.14a, le remplacement des fillers calcaires par la poudre de marbre engendre une augmentation des déformations différées totales par un pourcentage de 28.7 %. Par contre le remplacement des fillers calcaires par la poudre de verre entraine une diminution de 41.1 % des déformations différées totales. Selon Igarashi et al [Igarashi et al, 2000] et A. Kaman [Kaman, 2007], les bétons qui développent un retrait endogène élevé présentent aussi un grand potentiel de fluage et nos résultats sont en cohérence avec cette tendance. Concernant le laitier granulé, aucune différence mesurable entre les valeurs de déformation mais à long terme les déformations différées totales des BAP-LG sont légèrement supérieure que celles du BAP-FC.

En augmentant le rapport F/L à 0.2, figure IV.14b, le remplacement des fillers calcaires par des fines recyclées diminue le fluage total des BAPs. Cette diminution se diffère d'une fine recyclée à l'autre et elle est plus prononcée pour les fines de nature pouzolanique à savoir LG et PV. Selon L. Jianyong et al [Jianyong et al, 2001], le laitier granulé de haut fourneau ultrafin peut surtout contribuer à l'hydratation du ciment et augmenter la quantité des hydrates cristallins Aft et des hydrates de gel CSH dans la pâte de ciment, qui offre au béton durci une structure plus dense et une plus grande résistance à la déformation causée par la force appliquée. En outre, Güneyisi et al [Güneyisi et al, 2008] ont déclaré que le laitier granulé de haut fourneau peut également remplir les petits pores et les vides qui sont nocifs à la structure de béton. Cela peut être considéré comme le mécanisme d'effet réducteur des additions minérales ultrafines sur le fluage du béton. La même remarque pour les BAPs à base de la poudre de marbre et poudre de verre où on note une diminution de fluage total par un pourcentage de 23% et 37% respectivement par rapport au BAP témoin. On note aussi que même si la déformation initiale est plus élevée dans les échantillons des BAP-LG (FigureIV.12), leur déformation par fluage final est inférieure à celle des BAP-PM et PV. Cette constatation est en cohérence avec celle de [Heirman et al, 2008], [Loser et al, 2009]. B.P. Kavanaugh et al [Kavanaugh et al, 2008] a conclu que, à un rapport E / C fixe, les bétons autoplacants à base de laitier flue moins que ceux contenant des cendres volantes, indépendamment de l'âge au moment du chargement.

De manière générale, le potentiel de fluage diminue avec l'accroissement des propriétés mécaniques. Dans notre cas, on constate que l'augmentation du rapport F/L engendre une diminution des propriétés mécaniques accompagnées par une diminution des déformations différées totales et cela pour tous les BAPs (figure IV.14). D'après la littérature, l'utilisation des fillers calcaires peut augmenter le fluage [Poppe et al, 2005], tandis que l'utilisation de du laitier ou des cendres volantes semble de le diminuer [Heirman et al, 2008], [Loser et al, 2009]. Cette constatation est conforme avec nos résultats car l'utilisation des fillers calcaires à entrainer une légère augmentation des déformations totales aux premiers mois par contre l'ajout de laitier granulé à engendre une diminution de fluage total.

➤ LE COEFFICIENT DE FLUAGE

Les différents mélanges ont montré des différences de résistance à la compression et à la flexion. Lorsque la charge appliquée est identique pour tous les mélanges on ne sait pas si les différences entre les mélanges sont causées par des différences dans la résistance ou les

différences de comportement au fluage, dans un tel cas, le coefficient de fluage doit être utilisé pour comparer mutuellement les différents mélanges.

Le coefficient de fluage est défini comme le rapport de la déformation de fluage au temps « t » à la déformation élastique instantanée d'un échantillon soumis à une contrainte constante. La figure IV.15 représente l'évolution des coefficients de fluage total des BAPs confectionnés.

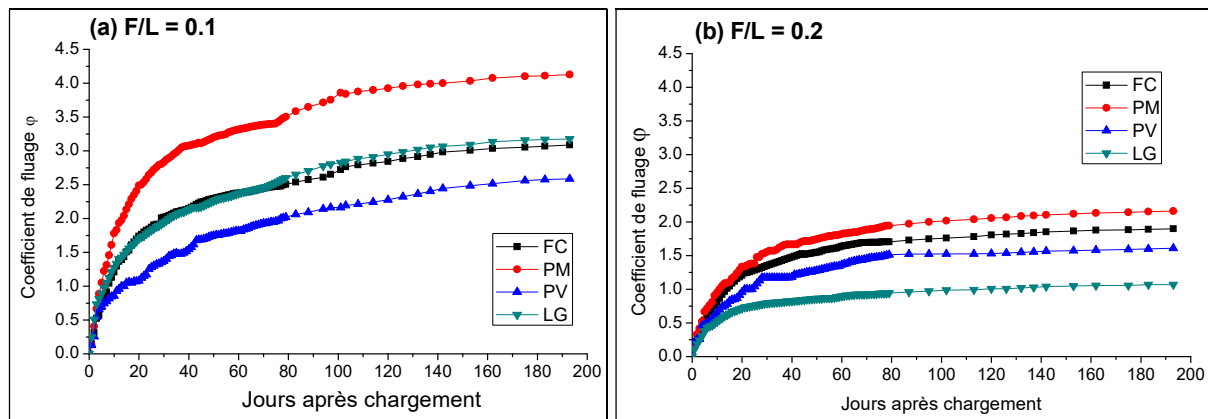


Figure IV. 15 : Le Coefficient de fluage total

Comme le montre la figure IV.15b, le remplacement total des fillers calcaires par la poudre de verre ou le laitier granulé entraîne une diminution de coefficient de fluage total. Tandis que le remplacement total des fillers calcaires par la poudre de marbre augmente ce coefficient. En évaluant l'influence des fines recyclées sur le fluage, le développement de résistance après le chargement doit être considéré.

Le BAP produit avec des fillers calcaires ou la poudre de marbre a une faible augmentation de résistance après le chargement que celui produit avec de la poudre de verre ou le laitier granulé. Par conséquent, le coefficient de fluage de ces deux derniers peut augmenter moins par rapport aux BAPs produits avec FC ou PM. Les mêmes observations sont faites par [Heirman et al, 2008], [Leeman et al, 2011]. La figure IV.16 représente l'évolution des coefficients de fluage endogène des BAPs confectionnés.

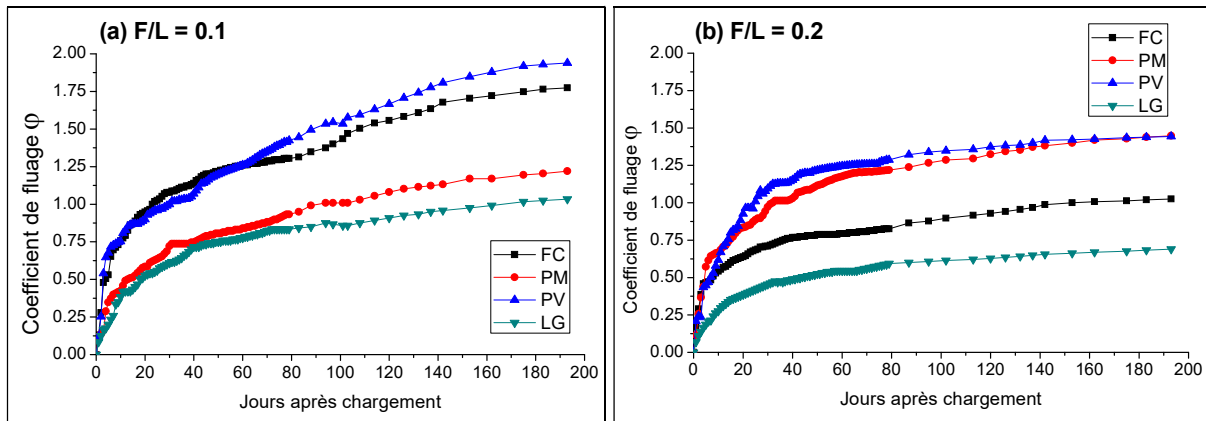


Figure IV. 16 : Le Coefficient de fluage endogène

D'après la figure IV.16, le coefficient de fluage endogène des BAPs diminue lors du remplacement total des fillers calcaires par le laitier granulé. Cette diminution est de l'ordre de 33% pour un rapport F/L = 0.2. De plus le coefficient de fluage endogène de BAP à base de laitier granulé représente la moitié de celui à base de PV. Car ce dernier a des coefficients de fluage endogène supérieurs à ceux du BAP témoin à base des fillers calcaires.

IV.3.3.3. CONFRONTATIONS DES RESULTATS DE FLUAGE AVEC LES CODES

Parmi les modèles de prédiction de contrainte en fonction du temps existants mentionnés ci-dessus (modèle B3, JSCE-2002, ACI-209, MC 2010, BPEL et EC 2), seulement les résultats des modèles EC 2 et BPEL sont présentés dans la discussion de ce travail (l'EC 2 est une norme européenne).

- Le modèle EC 2 utilise uniquement des paramètres qui sont bien connus pour le concepteur, à savoir, la résistance à la compression, la géométrie, RH de l'environnement exposé, l'âge de démoulage et le type de ciment pour prédire le fluage et l'évolution de retrait en fonction du temps.
- Le modèle de fluage du règlement BPEL « Béton Précontraint aux Etats Limites » [BPEL91, 1999] est largement employé en France. Les nombreuses structures construites avec ce mode de construction admettent une forte proportion des contraintes maintenues constantes.

Le tableau IV.3 représente la comparaison entre les résultats expérimentaux (EXP) (regroupe la déformation instantanée et différée) et théoriques (Eurocode 2 et BPEL) du fluage total. Les étapes de calcul des valeurs théoriques sont présentées dans l'Annexe B.

Tableau IV. 3: Confrontation des résultats expérimentaux de fluage total avec l'EC2 et le BPEL.

	F/L = 0.1				F/L = 0.2			
	FC	PM	PV	LG	FC	PM	PV	LG
EXP	470	605	277	501	449	332	300	300
EC2	221	228.69	225.05	173.37	314.81	338.44	250.16	197.08
BPEL	100.49	100.33	100.81	94.97	109.91	108.75	102.15	96.23

D'après le tableau IV.3, on constate que les déformations développées sont toujours supérieures à celles prédites par l'EC 2 et le BPEL, donc on peut dire que ces deux modèles sous-estiment les valeurs réelles du fluage total. Le modèle de fluage Eurocode 2, donne les déformation de fluage avec une précision plus ou moins acceptable par rapport au modèle BPEL.

IV.3.3.4. BILAN

Pour le fluage flexionnel, les éléments pouvant servir de comparaison avec nos résultats sont rares car la plupart des études portent sur le fluage du béton sous sollicitation de compression. Donc, en se basant sur l'analyse des flèches mesurées, les conclusions suivantes ressortent :

En mode de dessiccation (Total), le remplacement total des fillers calcaires par la poudre de verre ou le laitier granulé entraîne une diminution de fluage et le coefficient de fluage. Tandis que le remplacement total des fillers calcaires par la poudre de marbre augmente ce coefficient. Donc, les déformations de fluage total peuvent être conditionnées par la nature des fines car les poutrelles contenant des ajouts de nature pouzzolanique (poudre de verre) ou hydraulique latent (laitier) ont eu des déformations plus faibles que celles contenant des fillers calcaires ou poudre de marbre (ajouts inertes).

En mode endogène, remplacement total des fillers calcaires par la poudre de verre ou la poudre de marbre augmente le coefficient de fluage.

Concernant le coefficient de fluage, nos résultats confirment ceux de la littérature car le remplacement total des fillers calcaires par le laitier granulé diminue le coefficient de fluage total et endogène. Quant à la poudre de verre on note une diminution de coefficient de fluage total contrairement au mode endogène où on note une augmentation.

Enfin, la confrontation des résultats avec les prédictions de l'Eurocode2 et le BPEL montre que ces modèles sous-estiment les déformations différées sous charge dans des proportions parfois très importantes. Ce constat tend à prouver que les formules nécessiteraient une adaptation pour tenir compte des spécificités de formulation des bétons autoplaçants: volume de pâte, nature de l'addition minérale...

IV.4. CONCLUSION

Le traitement du comportement déformationnel sans et sous charge stationnaire de deux séries de bétons autoplaçants de même formulation de base, se différenciant principalement par le rapport F/L et la nature des fines recyclées, a été l'objectif de ce chapitre. Ainsi, de nombreux résultats expérimentaux ont été obtenus, correspondant à des bétons autoplaçants à base des fillers calcaires, poudre de verre, poudre de marbre et laitier granulé de haut fourneau.

En règle globale, on ne constate pas de comportements plus au moins différents entre eux. Il faut toutefois appuyer que les mélanges pris en compte sont formulés avec des constituants identiques sauf les fines recyclées utilisées.

L'introduction des fines recyclées dans la production des BAPs à un effet bénéfique sur leur comportement différé que ce soit le retrait ou le fluage flexionnel (une réduction de ces deux derniers a été noté en augmentant le rapport F/L à 0.2) notamment les BAPs contenant de la poudre de verre ou le laitier de haut fourneau.

Le béton autoplaçant contenant le laitier de haut fourneau peut être utilisé comme un béton précontraint car il a subi les plus faibles déformations de fluage ce qui diminue les pertes de précontrainte phénomène qui n'est pas désiré.

Les déformations différées des bétons d'origine physico-chimique comme le retrait ou mécanique comme le fluage sous contrainte peuvent mettre en cause la durabilité des ouvrages. Le chapitre suivant porte sur la durabilité, en étudiant la résistance aux cycles de gel dégel des différents bétons autoplaçants à base des fines recyclées.

CHAPITRE V : EFFET DES FINES RECYCLEES SUR LA RESISTANCE AUX CYCLES GEL-DEGEL DES BETONS AUTOPLAÇANTS.

V.1. INTRODUCTION

La durabilité d'un ouvrage est un des points clés du développement durable. Le but de ce chapitre est d'étudier la résistance aux cycles gel-dégel des bétons autoplaçants à base des fines recyclées locales et plus particulièrement l'effet de ces fines à savoir le laitier granulé de haut fourneau, la poudre de verre et la poudre de marbre sur cette résistance, et de les comparer au béton autoplaçant témoin à base des fillers calcaires.

Ce chapitre contient, des généralités sur le phénomène de gel-dégel brièvement présentées. Ensuite la campagne expérimentale adoptée et enfin les résultats et discussions. Dans cette partie de l'étude on s'est limité à un rapport F/L égale à 0.2 car le volume des fines nécessaire a été trop important comparativement au volume disponible pour l'étude.

V.2. GENERALITES SUR LE PHENOMENE DE GEL DEGEL

Le risque de détérioration par le gel d'un béton est particulièrement plus élevé lorsque son degré de saturation en eau est important. C'est notamment le cas des parties d'ouvrages non protégées des intempéries et en contact direct avec des eaux salées. Ces dégradations peuvent être amplifiées si le béton est mal conçu et elles se manifestent sous deux formes :

V.2.1. DETERIORATION PAR FISSURATION INTERNE

La fissuration interne peut se propager dans toute la masse de béton, mal conçu et soumise à de nombreux cycles de gel dégel.

Cette dégradation se manifeste par l'apparition d'une intense microfissuration du béton non seulement en surface mais aussi à l'intérieur de la masse de béton soumise au gel.

La fissuration interne diminue la performance du béton en réduisant considérablement ses caractéristiques mécaniques (résistances à la compression et à la traction, module élastique) et

son imperméabilité. Par exemple, un béton fortement attaqué par le gel interne peut affaiblir énormément sa cohésion.

V.2.2. DETERIORATION PAR ECAILLAGE

L'écaillage de surface est un mode de dégradation qui n'affecte que les surfaces de béton fortement exposées aux cycles de gel-dégel et des sels fondants. Il se manifeste par le décollement progressif de petites particules de pâte qui ont souvent la forme de petites écailles. En plus d'une dégradation esthétique de l'ouvrage, ce phénomène augmente sensiblement la perméabilité de surface et réduit l'épaisseur de recouvrement des aciers. Il favorise ainsi l'intrusion de substance délétère au sein du matériau et augmente le risque de corrosion des armatures [Mohamed, 2011]. L'écaillage de surface est pratiquement inexistant lorsque l'exposition au gel-dégel se fait en absence des sels fondants.

Ces deux formes de dégradation peuvent se produire simultanément ou de manière indépendante et elles peuvent affecter la durabilité de la structure.

V.2.3. LES MECANISMES DE DEGRADATION LIES A L'ACTION DE GEL-DEGEL

Plusieurs théories ont été proposées au cours des années pour expliquer la physique sous-jacente à l'endommagement par le gel des matériaux poreux cohésifs, tel que le béton, lorsqu'ils sont saturés en eau.

Il est généralement admis que l'accroissement de volume, de l'ordre de 9 %, accompagnant la transformation de l'eau en glace n'est pas la seule cause de la dégradation du béton. Powers [Powers, 1949a] a proposé une explication alternative connue dans la littérature sous l'appellation de « pression hydraulique ».

➤ Théorie des pressions hydrauliques, [Powers, 1949b]

Lors de la transformation de l'eau en glace son volume augmente de 9% tout en créant une pression sur les parois des pores. La dissipation de cette pression peut être effectuée par l'écoulement d'eau non gelée hors des pores à travers la pâte vers les bulles d'air les plus proches. Ce mouvement d'eau engendre une pression hydraulique, si elle dépasse la résistance en traction du béton, provoque la fissuration du béton dans la masse.

Cependant, Powers [Powers, 1949b] a mis en doute cette théorie car elle considère que l'eau est expulsée hors des pores capillaires alors qu'au contraire, il apparaît que l'eau passe des pores de silicates de calcium hydratés (C-S-H) vers les pores capillaires.

Cette approche l'a amené, en association avec Helmuth, à proposer une nouvelle théorie pour expliquer l'action du gel dans le béton.

➤ Théorie des pressions osmotiques Powers et Helmuth [Powers et al, 1953]

La théorie des pressions osmotiques est basée sur le fait que l'eau des capillaires est ionisée puis qu'il contient des ions alcalins (Na⁺, K⁺).

Lorsque la température diminue en dessous de 0 °C, l'eau des capillaires ne gèle pas immédiatement à cause du faible diamètre des pores capillaires et à la présence de substances en solution interstitielle qui abaisse le point de solidification de la glace.

A une température suffisamment basse, la glace se forme dans les plus gros pores. Cette formation de la glace n'est que partielle à cause des substances en solution car la glace se forme uniquement à partir des molécules d'eau et la solution non gelée devient de plus en plus concentrée en substances.

Durant la période de gel, la concentration de la solution non gelée augmente et crée un déséquilibre de concentration entre cette solution concentrée dans les gros pores et l'eau des pores les plus petits (Figure V.1).

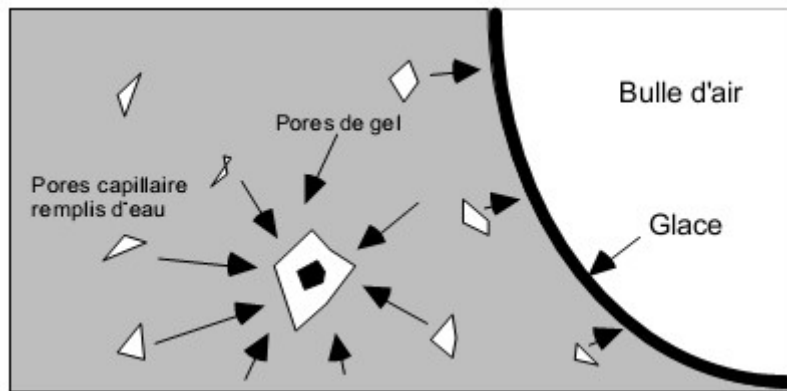


Figure V. 1: Représentation schématique du processus d'établissement des pressions osmotiques.

Par un phénomène d'osmose, l'eau des petits pores se dirige vers les plus gros pour rééquilibrer les concentrations. Si le pore est plein, il doit se dilater pour accommoder l'eau qui arrive, ce qui engendre une pression interne importante dite « pression osmotique » qui peut faire fissurer la pâte. L'amplitude de cette pression est d'autant plus importante que la concentration est élevée et la température est basse car le gel peut pénétrer un plus grand nombre de petits pores.

V.3. LA CAMPAGNE EXPERIMENTALE

Après le démoulage, les éprouvettes sont conservées dans l'eau (Photo V.1a) à une température de $20\pm 2^\circ\text{C}$ pendant 14 jours avant d'être soumises aux cycles gel-dégel dans l'enceinte climatique (Photo V.1b).



Photo V. 1: (a) Conservation des éprouvettes avant le test du gel-dégel (b) L'enceinte climatique.

A la fin de la cure, les éprouvettes sont immédiatement mises dans l'enceinte climatique et les cycles de gel-dégel sont ainsi effectués.

V.3.1. LES TESTS DU GEL-DEGEL

Deux essais normalisés relatifs à la résistance du béton aux cycles de gel-dégel sont recommandés. Il s'agit de :

- L'essai de gel dans l'eau dégel dans l'eau, défini au sein de la norme ASTM C 666, Procédure A et connu sous le nom d'essai du gel sévère,
- L'essai du gel dans l'air dégel dans l'eau, défini selon la norme ASTM C 666, Procédure B et appelé essai du gel modère.

Ce travail examine le comportement des bétons autoplaçants à base des fines recyclées locales confectionnés vis-à-vis l'action des cycles gel dégel à partir de 14 jours de cure où le béton a atteint plus de la moitié de son résistance. L'essai choisi pour déterminer la résistance au gel

des bétons étudiés dans le cadre de ce travail est l'essai du gel modéré, plus proches des conditions hivernales réelles que l'essai du gel sévère.

Les essais se composent de 60 cycles, qui durent chacun 12 heures, au cours desquels la température varie de 15 ± 2 °C à -18 ± 2 °C, avec une vitesse de 12 °C/h constante pour tous les mélanges (Figure V.2).

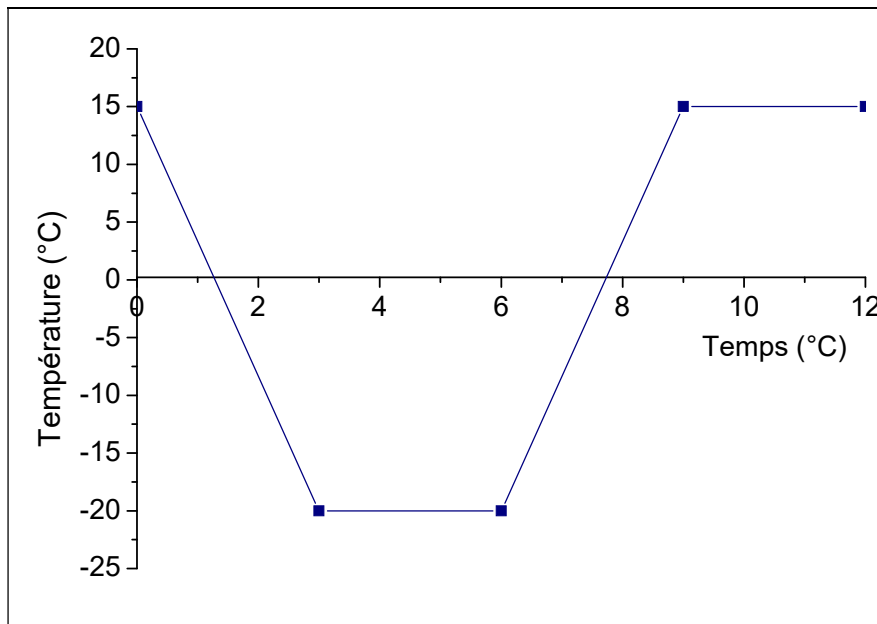


Figure V. 2: Evolution de température au cours d'un cycle du gel-dégel.

Les mesures ont été prises chaque 20 cycles pour déterminer l'allongement, la fréquence de résonance, la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion. Les moyennes des trois échantillons ont été utilisées pour chaque résultat expérimental.

V.3.2. ESSAIS DE DETERMINATION DES PROPRIETES RESIDUELLES

Afin de déterminer les propriétés résiduelles des bétons confectionnés, les éprouvettes sont retirées de l'enceinte climatique chaque 20 cycles (jusqu'à 60 cycles), puis elles sont séchées en les mettant dans une étuve à 40 °C jusqu'à stabilisation de la masse. Les essais réalisés sont les suivants :

- Essais destructifs : L'essai de compression, essai de traction par flexion ont été effectués.
- Essais non destructifs : La fréquence de résonance conformément à la norme P 18-414 et les variations dimensionnelles (l'allongement) ont été mesurées.

La mesure des fréquences de résonance, est effectuée à l'aide d'un appareil ultrason Tico, est utilisée pour déterminer le module élastique dynamique des bétons en fonction du nombre de cycles gel-dégel subis, photo V.2.



Photo V. 2: L'appareil utilisé pour la détermination de la fréquence de résonance.

Ces essais, rappelés dans le tableau V.3, sont effectués chacun sur une série de 3 éprouvettes.

Tableau V. 1 : Essais de caractérisation des propriétés résiduelles.

	Résistance à la compression	Résistance à la traction par flexion	Fréquence de résonance	Allongement
Prismes 7×7×28cm		×		×
Cubes 10×10×10cm	×		×	

Le béton est considéré comme résistant aux cycles gel-dégel:

- Si l'allongement relatif médian obtenu sur une série de trois prismes est inférieur à 500µm/m.
- Si le facteur de durabilité FD est supérieur à 60%.
- Si le critère de résistance défini par la norme PN-B-06250 est désigné, tous les bétons réalisés résistent au gel-dégel si la perte de résistance est inférieure à 20%.

V.4. RESULTATS ET DISCUSSION

V.4.1. VARIATIONS DIMENSIONNELLES

Les variations dimensionnelles des échantillons après différents cycles de gel-dégel modéré sont représentées sur la figure V.3. Tous les mélanges subissent un allongement lors du test de gel-dégel, si l'on se réfère au critère défini par la norme ASTM C 666, tous les bétons effectués résistant aux cycles de gel-dégel c'est à dire l'allongement est inférieur à 500 $\mu\text{m}/\text{m}$.

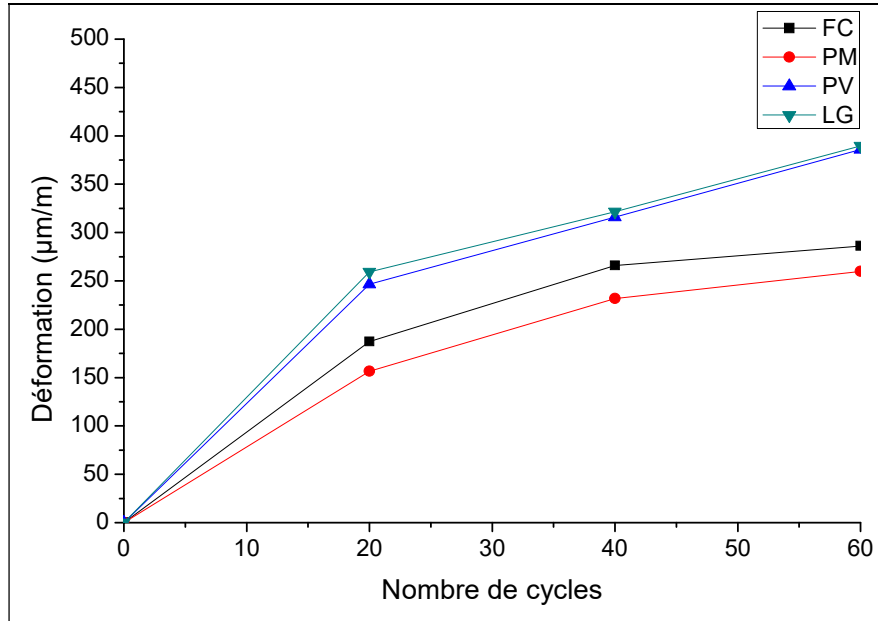


Figure V. 3: Les variations dimensionnelles en fonction du nombre de cycles.

D'après la figure V.3, on constate que le gonflement de béton autoplaçant à base de la poudre de marbre est le plus faible. Les BAPS contenant le laitier ont subi un gonflement plus important que celui contenant des fillers calcaires qui joue le rôle d'un béton témoin. Contrairement aux résultats de B. Persson [Persson, 2003] dans lesquels le BAP à base de laitier présente des changements de la longueur plus faibles que le béton à base des fillers calcaires ce qui indique une plus faible résistance au gel interne de ce dernier. De plus, on note d'après la figure V.3, que le comportement des BAPS à base de la poudre de verre est presque identique à celui à base de laitier.

V.4.2. EVOLUTION DES FREQUENCES DE RESONANCE

Le facteur de durabilité (FD) est lié à la variation de la fréquence de résonance et par conséquent le module d'élasticité dynamique.

Il peut être évalué par la relation :

$$FD = \frac{F_n^2}{F_0^2} \times 100$$

Ou :

F_0 est fréquence initiale mesurée avant le début des cycles de gel-dégel.

F_n est la fréquence mesurée à n cycles de gel-dégel.

Après les cycles de gel dégel, pour les échantillons présentant un facteur de durabilité :

$FD = 100$: aucune modification de structure dans le matériau ne s'est produite.

$FD > 100$: illustrent l'amélioration de la durabilité dans des conditions de gel / dégel.

$FD < 100$: l'intégrité du matériau dans des conditions de gel / dégel est compromise, et l'endommagement structurel s'est produit.

D'après la norme ASTM C 666 le matériau est qualifié non résistant au gel lorsque le facteur de durabilité atteint une valeur inférieure à 60%, ou autrement dit une perte de 40% de sa valeur initiale. Le calcul du FD à partir des fréquences mesurées donne les résultats présentés dans la figure V.4.

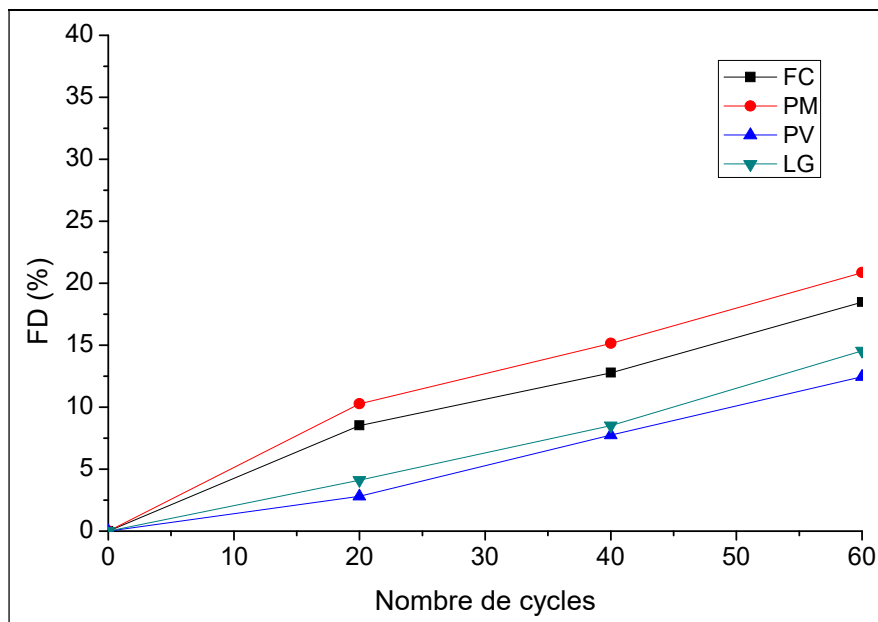


Figure V. 4: Evolution des fréquences de résonance en fonction du nombre de cycles.

A l'évidence, le BAP-LG et le BAP-PV sont moins sensible au gel modéré par rapport au BAP témoin à base des fillers calcaires. D'après la figure V.4, on constate aussi que le BAP-PM est plus sensible aux cycles de gel-dégel que le BAP-FC du fait qu'au bout de 60 cycles le facteur atteint la valeur 20% pour le BAP-PM et 18% pour le BAP-FC. L'augmentation de la perte du facteur de durabilité est due à l'apparition des microfissures au sein des éprouvettes testées. Ceci s'explique par le fait que les ondes se propagent moins bien dans un milieu endommagé que non endommagé [Mohamed, 2011].

On peut dire que l'évolution du facteur de durabilité relatif au module d'élasticité dynamique traduit une dégradation pour tous les bétons autoplaçants testés; dégradation plus accentuée pour les BAPs à base de la poudre da marbre par rapport à celui à base de filler calcaire et moins prononcée lorsque ce dernier est remplacé par la poudre de verre ou le laitier dans le béton.

V.4.3. VARIATIONS DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION

L'effet des cycles gel/dégel sur la résistance en compression est quantifié par le calcul de la variation relative de cette propriété, définie par l'expression :

$$FD_f = \left(1 - \frac{f}{f_0}\right) \times 100$$

Où f_0 est la résistance en compression avant les essais de gel/dégel et f celle du béton après l'action du gel-dégel.

Les résultats de la perte de résistance en compression des éprouvettes cubiques soumis aux cycles de gel-dégel modéré chaque 20 cycles sont représentés dans la figure V.5. Une perte de résistance à la compression continue a été enregistrée pour tous les mélanges mais avec des différents degrés, si l'on se réfère au critère de résistance définie par la norme PN-B-06250, tous les bétons effectués résistant aux cycles de gel-dégel autrement dit la perte de résistance est inférieure à 20%.

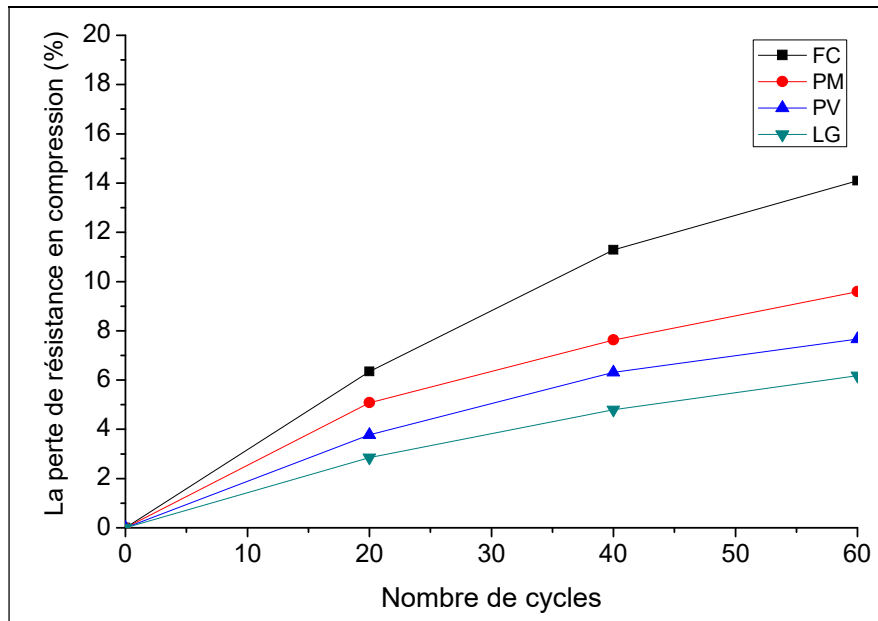


Figure V. 5: Evolution de la perte de résistance à la compression en fonction du nombre de cycles.

Comme le montre la figure V.5, la perte de résistance à la compression est clairement influencée par le type des fines recyclées [Amouri et al, 2014]. Le BAP-FC qui joue le rôle de témoin a subi une perte de résistance après l'action de gel dégel de l'ordre de 14%. Ces résultats sont proches à ceux de Xie et al [Xie et al, 2002] dans lesquels la perte de résistance à la compression après les cycles de gel-dégel était de 11%. Cette perte est liée à l'absorption d'eau par les échantillons. Des microfissures existent principalement dans les interfaces pâte de ciment-granulat dans le béton même avant toute activité de chargement et des effets environnementaux. Lorsque le nombre de cycles de gel-dégel augmente le degré de saturation dans des structures poreuses augmente en aspirant de l'eau à proximité de la surface du béton pendant le processus de décongélation à une température supérieure à 0°C. Certains pores sont remplis complètement avec l'eau. En dessous du point de congélation de ces pores l'augmentation du volume de la glace provoque une tension dans le béton environnant. Si la contrainte de traction est supérieure à la résistance en traction du béton, des microfissures se produisent. Par la persistance des cycles gel-dégel, plus l'eau pénètre dans les fissures existantes lors de la décongélation, ce qui provoque une expansion plus élevée et plus de fissures lors de la congélation. La zone de chargement va diminuer avec l'initiation et la croissance de chaque nouvelle fissure. Nécessairement la résistance à la compression diminue avec les cycles gel-dégel [Shang et al, 2008], [Gencel et al, 2010], [Gencel et al, 2012].

L'évolution croissant de la perte de résistance en compression montre que tous les bétons testés subissent une fissuration induite par la formation de la glace. D'après la figure V.5, on constate que le remplacement des fillers calcaires par des fines recyclées tel que la poudre de marbre et la poudre de verre et des sous-produits tel que le laitier a amélioré la résistance aux cycles gel-dégel des BAPS par un pourcentage de 31.9%, 45.6% et 56.2% respectivement. Cette constatation confirme les résultats obtenus par l'essai de la fréquence de résonance et on peut dire que les BAPS à base des fines pouzzolaniques sont plus résistants aux cycles de gel-dégel que ceux à base des fines à caractère inerte.

V.4.4. VARIATIONS DE LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION

La variation de la résistance à la traction par flexion des bétons autoplaçants en fonction du nombre de cycles gel-dégel est calculée par l'expression :

$$FD_f = 100 \times \left(1 - \frac{f}{f_0}\right)$$

Avec f la résistance à la flexion à l'échéance de n cycles, et f_0 la résistance mesurée avant le début des cycles gel-dégel.

Les pertes de résistance en traction par flexion des bétons autoplaçants à base des fines recyclées, chaque 20 cycles gel-dégel, sont représentées sur la figure V.6.

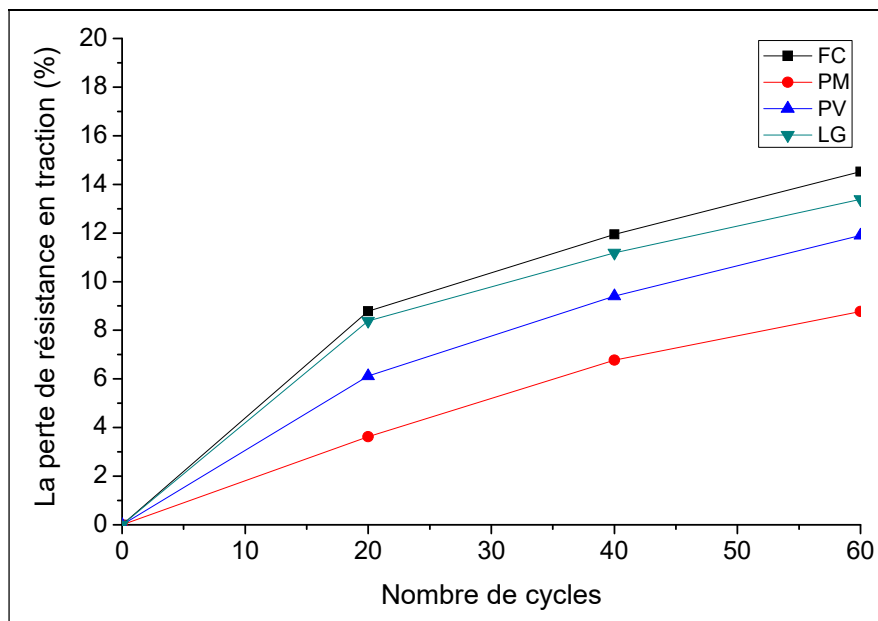


Figure V. 6: Evolution de la perte de la résistance à la traction par flexion en fonction du nombre de cycles.

Comme le montre la figure V.6, la résistance à la traction diminue fortement sous l'effet des cycles de gel-dégel modéré; la baisse de la résistance à la traction initiale est d'environ 14,5%, 8,8%, 11,9% et 13,4% après 60 cycles de gel-dégel pour les bétons autoplaçants à base des fillers calcaires, poudre de marbre, poudre de verre et laitier granulé respectivement. Donc, le remplacement des fillers calcaires par des fines recyclées entraîne une diminution de la perte de résistance.

En outre, on peut noter que, après le même nombre de cycles, la perte de résistance à la traction est supérieure à la perte de résistance à la compression cubique. Cette conclusion est en cohérence avec celle de [Girodet, 1996] et [Amouri et al, 2014]. La raison est la suivante: lorsque l'échantillon est sous l'action d'une charge de compression, les fissures sont provoquées en parallèle à cette action. Cela signifie que l'endommagement est provoqué par la concentration de la contrainte de traction perpendiculaire à la charge de compression. Donc, l'influence des cycles de gel-dégel sur la résistance à la traction est supérieure à la résistance à la compression [Shang et al, 2012]. Quant à C. Girodet [Girodet, 1996], son hypothèse est que, le gel interne altère avant tout l'interface pâte-granulats, dont la résistance en flexion caractérise bien l'état d'endommagement plus que la résistance en compression. Les résistances en compression sont moins sensibles à cet endommagement puisque cet essai provoque plutôt des glissements, des arrangements de cristaux [Girodet, 1996].

V.4.5. OBSERVATIONS VISUELLES DE LA DEGRADATION

Matériaux cimentaires, après les réactions d'hydratation, ont une microstructure très complexe, contenant C-S-H gels, les cristaux minéraux et des pores partiellement ou totalement occupé par l'eau. Le changement de phase de l'eau interstitielle confiné en glace peut créer une pression interstitielle importante et causer la détérioration des matériaux à l'échelle macroscopique [Zeng et al, 2011].

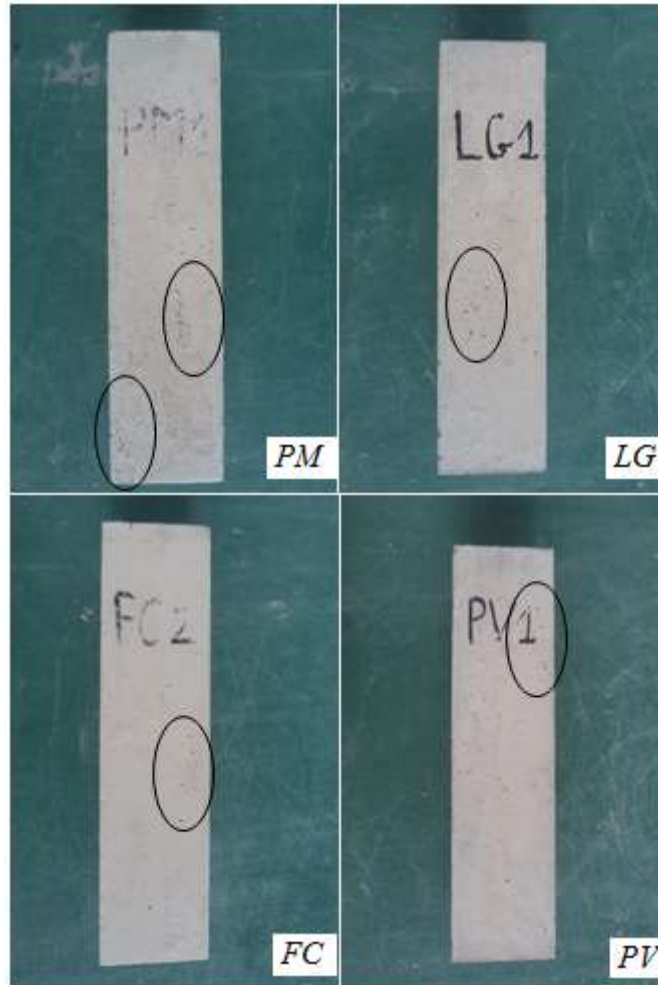


Photo V. 3: Les observations visuelles des dégradations.

Un examen visuel a été réalisé afin d'évaluer les signes visibles de fissuration et l'effritement de la surface des échantillons après soumission à l'effet du gel dégel. En référence aux photos V.3, tous les échantillons présentent des surfaces rugueuses après les 60 cycles de gel dégel notamment les éprouvettes des bétons autoplçants à base de la poudre de marbre.

V.5. CONCLUSION

Ce chapitre porte sur l'impact des fines recyclées locales sur les performances des bétons autoplçants soumis aux cycles gel-dégel modéré selon la norme ASTM C 666 en adaptant la rugosité hivernale au contexte Algérien par l'utilisation d'un faible nombre de cycles. Trois fines recyclées ont été utilisées la poudre de marbre, la poudre de verre et le laitier granulé de haut-fourneau plus les fillers calcaires qui joue le rôle de témoin. Les principaux résultats obtenus montrent que :

A 60 cycles de gel-dégel, tous les bétons autoplaçants confectionnés résistent à l'action du gel modéré. Les mélanges qui ont eu les meilleurs caractéristiques avant les cycles de gel dégel, à savoir les bétons autoplaçants à base de laitier granulé et poudre de verre, sont les plus résistants. Selon les résultats obtenus, on peut dire que les BAPs à base des fines pouzzolanique sont plus résistant aux cycles gel-dégel que ceux à base des fines à caractère inerte.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre étude était de produire des bétons autoplaçants contenant des fines recyclées de faible impact environnemental, et ce à travers l'exploitation des laitiers de haut fourneau et des déchets de la marbrerie et de verre qui sont disponibles en grande quantité dans le marché Algérien.

Ce travail a été mené sur trois volets. Dans le premier volet, deux campagnes d'essais ont été réalisées sur deux séries de bétons autoplaçants (F/L variable) afin d'évaluer les effets du remplacement total des fillers calcaires par des fines recyclées respectivement à l'état frais (qualification) et durci (caractérisation). Le deuxième volet s'intéresse à l'étude des comportements différés sans charge (retrait libre) et sous charge stationnaire constante (fluage flexionnel) des deux séries de bétons. Le troisième volet porte sur la durabilité, en étudiant la résistance aux cycles gel dégel des différents bétons autoplaçants à base des fines recyclées.

En se basant sur les résultats obtenus, on peut dire qu'il est possible de produire un BAP incorporant des fines recyclées comme ajouts cimentaires alternatifs locaux dans une optique de développement durable.

Le mélange le plus coulant et le plus résistant mécaniquement est celui obtenu avec le laitier de haut fourneau. Concernant les bétons autoplaçants à base de la poudre de marbre et la poudre de verre les résultats obtenus donnent satisfaction.

L'introduction des fines recyclées dans les bétons autoplaçants jusqu'à un rapport F/L égal à 0.2 n'a pas des suites néfastes sur le retrait libre total et endogène.

L'auto-dessiccation étant le facteur majeur qui conditionne le retrait endogène, son efficacité est d'autant plus grande que les performances mécaniques sont élevées. Donc, la diminution de retrait endogène constatée, avec l'augmentation du rapport F/L, correspond à la légère diminution des résistances des bétons autoplaçants.

La poudre de verre génère un retrait total plus faible que les autres fines utilisées. Outre, le remplacement des fillers calcaires par des fines recyclées augmente le retrait endogène et diminue le retrait de dessiccation.

Généralement, le potentiel de fluage diminue avec l'accroissement des propriétés mécaniques (résistance en compression, en traction et le module d'élasticité). Dans notre cas,

l'augmentation du rapport F/L engendre une diminution des propriétés mécaniques accompagnée par un faible fluage flexionnel (total et endogène) et cela pour tous les BAPs ce qui illustre l'effet positif de l'introduction des fines recyclées sur le fluage flexionnel des bétons autoplaçants.

En rapport charge appliquée/résistance, les poutrelles de laitier de haut fourneau sont les plus sollicitées mais ils présentent un fluage et un coefficient de fluage flexionnel, total et endogène, plus faible que les autres poutrelles. Quant aux poutrelles de la poudre de verre, les moins sollicitées, une diminution de coefficient de fluage total et une augmentation de coefficient de fluage endogène ont été notés par rapport aux poutrelles à base des fillers calcaires. Concernant la poudre de marbre, elle génère des coefficients de fluage total plus élevés par rapport aux fillers calcaires. Donc, les déformations de fluage total peuvent être conditionnées par la nature chimique (pouzzolanique, hydraulique latent et inerte) des fines recyclées utilisées.

Selon les performances mécaniques, les bétons autoplaçants confectionnés peuvent les installer sur le marché de construction comme des bétons d'ouvrage en particulier les BAPs en poudre de verre ou laitier de haut fourneau.

Pour une construction courante nécessitant une résistance à la compression de 30 MPa (similaire au béton de bâtiment couramment utilisé dans les chantiers Algériens), un béton autoplaçant en poudre de marbre est absolument convenable.

Le béton autoplaçant contenant le laitier de haut fourneau peut être utilisé comme un béton précontraint car il a subi les plus faibles déformations de fluage ce qui diminue les pertes de précontrainte phénomène qui n'est pas désiré.

L'introduction des fines recyclées dans la production des BAPs à un effet bénéfique sur leur comportement différé que ce soit le retrait libre ou le fluage flexionnel (une réduction de ces deux phénomènes a été notée en augmentant le rapport F/L à 0.2) notamment les BAPs contenant de la poudre de verre ou le laitier de haut fourneau.

Du point de vue durabilité, les bétons autoplaçants contenant du laitier de haut fourneau ou de la poudre de verre présentent des meilleures résistances aux cycles de gel dégel que ceux à base des fillers calcaires (béton de référence). A des teneurs en air presque identiques, les BAPs qui ont eu les meilleurs caractéristiques avant les cycles de gel dégel sont les plus résistants.

Les travaux effectués dans cette thèse ont considéré comme paramètres la nature des fines recyclées et le rapport F/L qui influe sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons. Cette étude peut être approfondie et enrichie en procédant à:

- à des examens microstructuraux par microscopie électronique à balayage des bétons autoplacants pris en considération dans cette étude. Cela permettrait d'établir un lien entre la rhéologie et la densification de la microstructure des pâtes.
- à l'identification des phases cristallines par diffractométrie des rayons X.
- aux mesures porométriques et de perméabilité.
- à l'étude de la contribution des fines recyclées à la résistance chimique des bétons autoplacants.
- à une analyse de l'effet des superplastifiants de diverses natures sur la plasticité des mélanges cimentaires frais avec des fines recyclées (Rhéomètre).
- à la modélisation pour confirmer ou infirmer certaines hypothèses, notamment pour les mécanismes d'action de la poudre de verre.
- à l'étude de fluage en tension des bétons autoplacants à base des fines recyclées.
- à l'étude de la résistance à la fatigue des poutres en bétons autoplacants à base des fines recyclées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[Acker et al, 2001] P. Acker, F. J. Ulm, Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements, *Nuclear Engineering and Design*, 203, 2001, p 143-158.

[Adam, 2014] R. Adam, Électif 10 Mise en forme industrielle des sols et matériaux granulaires. Cours 3 : Les ciments, liants hydrauliques. <http://slideplayer.fr/slide/1185055/>

[Al-Khaja, 1994] W.A. Al-Khaja., Strength and time-dependend deformations of silica fume concrete for use in Bahrain. *Constr Build Mater* 8, (1994), pp 169–72.

[Amouri et al, 2014] C. Amouri, S. Bensalem, A. Belkadi, H. Houari, M. Belachia., Evaluation of the performances of self-compacting concretes based on by-products subject to freeze thaw in local conditions. *International Journal of Engineering, Science and Technology* 6 (4), 2014, pp 45-51.

[Assié, 2004] S. Assié « Durabilité des bétons autoplaçants » Thèse de Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2004.

[Ayed et al, 2009] K. Ayed, A Benaissa, T. Vidal, G. Pons, A. Abidlah. Etude du comportement différé du BAP, l'influence de la pouzzolane naturelle de Beni Saf sur le retrait du béton auto plaçant. *SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran - Algeria*, 2009, pp 283-288.

[Ayed et al, 2012] K. Ayed, A. Benaissa, T. Vidal, G. Pons. Étude du retrait et du fluage des bétons autoplaçants à base de pouzzolanes naturelles et de fines siliceuses algériennes. *Canadian Journal of Civil Engineering* 39(1), 2012, pp10-19.

[Bal, 2009] L. Bal « Modélisation du retrait et du fluage du béton par réseaux de neurones », Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, 2009.

[Baroghel-Bouny, 1994] V. Baroghel-Bouny, « Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons » Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1994.

- [Baron et al, 1982] J. Baron, R. Sauterey, « Le béton hydraulique : connaissance et pratique », Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 560 pages, Paris, France, 1982.
- [Bažant et al, 1997a] Z.P. Bažant, Y. Xiang., Crack growth and lifetime of concrete under long time loading. *Journal of Engineering Mechanics* 123(4), 1997, pp 350-358.
- [Bažant et al, 1997b] Z.P. Bažant, A.B. Hauggaard, S. Baweja, F.J. Ulm., Microprestress-solidification theory for concrete creep. I. Aging and drying effect. *Journal of Engineering Mechanics*, 123 (11), 1997, pp 1188-1194.
- [Behim et al, 2009] M. Behim et T. Ali Boucetta, « Effet des additions micronisées sur l'écoulement des bétons autoplaçants (laitier de haut fourneau, filler calcaire et poudre de verre) », ENSET Oran (Algeria) - Octobre 12-14, 2009.
- [Behim, 2005] M. Behim, « Sous-produits industriels et développement durable : réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'el Hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire ». Thèse Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2005.
- [Benboudjema, 2002] F. Benboudjema, « Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs de centrales nucléaires », Thèse de l'Université de Marne La Vallée, 2002
- [Benboudjema et al, 2005] F. Benboudjema, F. Meftah, and J.M. Torrenti., Interaction between drying, shrinkage, creep and cracking phenomena in concrete, *Engineering Structures* 27, 2005, pp 239–250.
- [Benkechkeche et al, 2009] G. Benkechkeche, H. Houari., Influence des paramètres de composition sur le fluage des poutrelles en béton autoplaçant. SBEIDCO – 1st, International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET, Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.
- [Benkechkeche, 2012] G. Benkechkeche., « Contribution à l'étude des mécanismes liés au retrait et fluage (déformations différées) des bétons ». Thèse de Doctorat, Université Constantine 1, 2012.
- [Bensalem et al, 2014] S. Bensalem, C. Amouri, H. Houari, M. Belachia., Elaboration and characterization of self-compacting concrete based on local by-products. *International Journal of Engineering, Science and Technology* 6 (1), 2014, pp 98-105.

- [Bensalem et al, 2016] S. Bensalem, C. Amouri, H. Houari & M Belachia,. Influence of recycled fines on the flexural creep of self-compacting concrete beams under four-point bending load. *Journal of Adhesion Science and Technology* 31(14), 2017, pp 1515-1523.
- [Bentalha, 2007] M. Bentalha, « Influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire. Caractérisation- Comportement monotone – Microstructure » Thèse Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [Benia, 2006] M. Benia., « Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux ». Mémoire Magister, Université Mohamed Boudiaf, M'Sila, 2006.
- [Bezzi, 2011] T. Bezzi, « Etude et caractérisation d'un béton autoplaçant fait à base d'un ciment avec ajout d'argile cuite et broyée ». Mémoire Magister, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2011.
- [Bermejo et al, 2010] E.B. Bermejo, J.C. Gálvez, M.F. Cánovas., Shrinkage and creep of medium-low strength self-compacting concrete. 3rd fib International Congress 2010.
- [Berthollet, 2003] A. Berthollet, « Contribution à la modélisation du béton vis-à-vis du vieillissement et de la durabilité : interaction des efforts de fluage et du comportement non-linéaire du matériau », Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003.
- [Bessa-Badreddine, 2004] A. Bessa-Badreddine, « Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers ». Université de Cergy-Pontoise, 2004.
- [Billberg, 2001] P. Billberg, Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration. *Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, Japon, pp. 285-294, 23-25 octobre 2001.
- [Bissonnette et al, 1999] B. Bissonnette, P. Pierre, M. Pigeon., Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. *Cement Concrete Res* 25(5), 1999, pp 1075–85.
- [Bonavetti et al, 2001] V.L. Bonavetti, V.F. Rahhal, EF. Irassar., Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. *Cem Concr Res* 31, 2001, pp 853–9.

[Bonavetti et al, 2003] V. Bonavetti, H. Donza, G. Menández, O. Cabrera, E.F. Irassar., Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy. *Cem Concr Res* 33(6), 2003, pp 865–71.

[Boudchicha, 2007] A. Boudchicha, « Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons ». Thèse de doctorat d'état en Génie Civil, Université Mentouri Constantine, 2007.

[Boukhelkhal, 2012] A. Boukhelkhal, « rhéologie caractérisation physico mécanique et durabilité des durabilité des bétons autoplaçants à base de la poudre de marbre poudre de marbre », Mémoire de Magister, Université Ammar Telidji, Laghouat 2012.

[Boukni et al, 2010] B. Boukni, H. Houari, « Etude de l'influence du rapport ciment/liant (c/l) et du mode de conservation sur le retrait des bétons autoplaçants ». *Sciences & Technologie B* – N°31, 2010, pp 17-22

[Boukni et al, 2012] B. Boukni. « Contribution à l'étude expérimentale du comportement thermomécanique des bétons autoplaçants ». Thèse doctorat, Université Mentouri Constantine, 2012.

[Boukendakdji et al, 2009] O. Boukendakdji, S. Kenai, E.H. Kadri, F. Rouis. Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete. *Construction and Building Materials* 23, (2009), pp 2593–2598.

[Boukendakdji et al, 2012] O. Boukendakdji, E. Kadri, S. Kenai, Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete, *Cement & Concrete Composites* 34, (2012), pp 583–590.

[Bouzoubaa et al, 2001] N. Bouzoubaa, M. Lachemi., Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash preliminary results. *Cement Concrete Res* 31(3), 2001, pp 413–20.

[Brooks, 1999] J.J. Brooks, How admixtures affect shrinkage and creep, *Concr Int* 21, 1999, pp 35-38.

[Brooks, 2001a] J.J. Brooks., The influence of pore stress on creep of hardened cement paste. Dans *Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of concrete and other Quasi-Brittle*

Materials, édité par F.J. Ulm, Z.P. Bažant and F.H. Witmann, Elsevier, Cambridge, 2001, pp. 61-66.

[Brooks et al, 2001b] J.J Brooks, M.A Megat Johari « Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete” *Cement and Concrete Composites* 23(6), 2001, pp 495–502.

[Brue, 2009] F. BRUE., « Rôles de la température et de la composition sur le couplage thermo-hydro-mécanique des bétons » Thèse de Doctorat, ECOLE CENTRALE DE LILLE, 2009.

[Byars et al, 2004] E.A. Byars, B. Morales, H. Zhu. ConGlassCrete II project final report. 2004.

[Caijun et al, 2007] S. Caijun, Z. Keren., A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resour Conserv Recycl* 52, 2007, pp 234–247.

[Chabane, 2008] A. Chabane. « Comportement différé des variétés de bétons : mise en place d’un bâti de fluage » Thèse de Doctorat en science, Université Mentouri Constantine, 2008.

[Chaid et al, 2010] R. Chaid, R. Jauberthie et A. Boukhaled, « Effet de l’ajout calcaire sur la durabilité des bétons » *Lebanese Science Journal* 11(1), 2010.

[Chan et al, 2004] Y.W. Chan, J.C. Chern, C.Y. Hong and J.W. Lue., The analysis of Shrinkage behavior of SCC and OPC under various weather conditions. *RILEM Proceedings PRO* 17, 2004.

[Chekireb, 2015] S. Chekireb, « Valorisation de la poudre de verre dans le béton autoplaçant » Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 2015.

[Craeye et al, 2010] B. Craeye, G. De Schutter, B. Desmet, J. Vantomme, G. Heirman, L. Vandewalle. « Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete” *Cem Concr Res* 40, 2010, pp. 908–913.

[De Larrad et al, 1996] F. De Larrad et al., Mix design of self-compacting concrete. *RILEM International Conference on Production methods and workability of concrete*, pp 439-451, Glasgow, 1996.

- [Diederich, 2010] P. Diederich., « Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton ». Thèse Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2010.
- [Divet et al. 2006] L. Divet, R. Le Roy, et G.V. Rompaey., Hydratation des laitiers de haut fourneau, Rapport LCPC, 2006.
- [DGM, 2010] DIRECTION GENERALE DES MINES « Bilan des activités minières année 2009 », Edition 2010.
- [Esping, 2008] O. Esping, "Effect of limestone filler BET (H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research* 38, 2008, pp 938–944.
- [Felekoglu et al, 2007] B. Felekoglu, S. Turkel, B. Baradan, Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, University de Dokuz Eylul, 2007.
- [Fortin, 2005] C. Fortin., « Curling and strain monitoring of slabs strips in a laboratory environment » Faculté de sciences et génie, Université LAVAL, QUÉBEC, 2005.
- [Frohard, 2014] F. Frohard., « Durabilité des éco bétons : impact d'additions cimentaires alternatives sur la corrosion des armatures dans les bétons armés ». Science des matériaux. Thèse Doctorat, Université Paris-Est, 2014.
- [Gardner et al, 1993] N.J. Gardner, J-W. Zhao., Creep and shrinkage revisited. *ACI Mater J* 90 (3),1993, pp 236–46.
- [Gencela et al 2010] O. Gencel, W. Brostow, C. Ozel, M. Filiz., Concretes containing hematite for use as shielding barriers. *Materials Science-Medziagotyra* 6(3), 2010, pp 249-256.
- [Gencela et al, 2012] O. Gencela, C. Ozel, F. Koksal, E. Erdogmus, Gonzalo Martínez-Barrera, Witold Brostow “Properties of concrete paving blocks made with waste marble” *Journal of Cleaner Production* 21, 2012, pp 62-70.
- [Gesoglu et al, 2009] M. Gesoglu, E. Güneyisi, E. Özbay., Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast

furnace slag, and silica fume. *Construction and Building Materials* 23(5), 2009, pp 1847–1854.

[Gesoglu et al, 2012] M. Gesoglu, E. Güneyisi, M.E. Kocabağ, V. Bayram, K. Mermerdas. Fresh and hardened characteristics of self-compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash. *Construction and Building Materials* 37, 2012, pp 160–170

[Girodet, 1996] C. Girodet « Endommagement des mortiers sous sollicitations thermo-mécaniques : Influence des caractéristiques des matériaux sur la résistance au gel interne des bétons ». Thèse Doctorat, INSA Lyon, 1996.

[Granger, 1996] L. Granger, « Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires. Analyse et modélisation », Thèse de doctorat de l'ENPC, avril 1996.

[Grzeszczyk et al, 2009] S. Grzeszczyk and P. Podkowa,. The Effect of Limestone Filler on the Properties of Self Compacting Concrete. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society* 17, 2009.

[Guetteche et al, 2001] M.N. Guetteche., H. Houari,. Caractérisation et activation des laitiers de haut fourneau d'El-Hhadjar par le clinker. *Sciences & Technologie – N°15*, 2001, pp. 131-135.

[Güneyisi et al, 2010] E. Güneyisi, M. Gesoglu, E. Özbay,. Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures. *Construction and Building Materials* 24, 2010, pp 1878–1887.

[Hammer et al, 2001] T.A. Hammer, K. Johansen, Ø. Bjøntegaard, Volume changes as driving forces to self-induced cracking of Norwegian SCC, in: K. Ozawa, M. Ouchi (Eds.), *Proceedings of Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, 2001, pp. 423–432.

[Hammer et al, 2007] T.A. Hammer, The influence of some mix design parameters on drying shrinkage of SCC, in: G. De Schutter, V. Boel (Eds.), *Proceedings of 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM Publications S.A.R.L., Ghent, 2007, pp. 559–564.

- [Heirman et al, 2008] G. Heirman, L. Vandewalle, D. Van Gemert, V. Boel, K. Audenaert, G. De Schutter, et al. Time-dependent deformations of limestone powder type self-compacting concrete. *Eng Struct* 30, 2008, pp 2945–56.
- [Houari, 1993] H. Houari. « Contribution à l'étude du comportement du béton renforcé de fibres métalliques soumis à l'action des charges maintenues et cycliques ». Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, Lyon; 1993.
- [Houze, 2013] C. Houze,. « Etude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silico manganèse ». Thèse Doctorat, Université Paris-Est, 2013.
- [Hua, 1995] C. Hua, « Analyses et modélisations du retrait d'autodessiccation de la pâte de ciment durcissante », Thèse de doctorat, Laboratoire des ponts et chaussées, 159 p., 1995
- [Husson, 1991] S. Husson. « Etude physicochimique et mécanique des interactions ciment-fillers. Application aux mortiers ». Génie des procédés. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 1991.
- [Itim et al, 2011] A. Itim, K. Ezziane, E. Kadri. Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions. *Construction and Building Materials* 25, 2011, pp 3603–3609.
- [Jensen et al, 1996] O.M. Jensen, P.F. Hansen, Autogeneous deformation and change of the relative humidity in silica fume-modified cement paste, *ACI Mater J* 93(6), 1996, pp 539-543.
- [Jianyong et al, 2001] Jianyong L, Yan Y. A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete. *Cement Concrete Res* 31(8), 2001, pp 1203–6.
- [Johnston, 1982] C.D. Johnston «Steel fiber reinforced and plain concrete factors influencing flexural strength measurement. »*ACI materials journal* 79 (2), 1982, 12 p.
- [Kamen, 2007] A. Kamen « comportement au jeune âge et différé d'un BFUP écrouissant sous les effets thermomécaniques » Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, Suisse, 2007.
- [Kavanaugh et al, 2008] B.P. Kavanaugh, A.K. Schindler, R.W. Barnes,. Creep behavior of self-consolidating concrete. 2008.

- [Khatib, 2008] J.M. Khatib,. Performance of self- compacting concrete containing fly ash“. *Construction and Building Materials* 22, 2008, pp 1963–1971.
- [Khatri et al, 1995] R.P. Khatri, V. Sirivivatnanon, W. Gross,. Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete. *Cement and Concrete Research* 25(1), 1995, pp 209-220.
- [Khelidj et al, 1998] A. Khelidj, A. Loukili, and G. Bastian,. Etude expérimentale du couplage hydro-chimique dans les bétons en cours de maturation : incidence sur les retraits. *Materials and Structures* 31, 1998, pp. 588-594.
- [Khmiri et al, 2012] A. Khmiri, B. Samet, M. Chaabouni. “Assessment of the waste glass powder pozzolanic activity by different methods”. *IJRRAS* 10 (2), 2012, pp 322-328.
- [Kirgiz, 2013] M.S. Kirgiz,. Characteristic Properties of Marble and Brick Powders. *Advanced Materials* 749, 2013, pp 483-490
- [Ladaoui, 2010] W. Ladaoui,. « Etude expérimentale du comportement Thermo-Hydro-Mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs ». Thèse de Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2010.
- [Lawrence et al, 2005] P. Lawrence, M. Cyr, E. Ringot,. Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. *Cement Concrete Research* 35, 2005, pp 1092–105.
- [Leemann et al, 2011] A. Leemann, P. Lura ;. Creep and shrinkage. In: Khayat KH, De Schutter G, editors. *State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee MPS: Mechanical properties of self-compacting concrete*. Springer; 2011.
- [Loser et al, 2009] R. Loser, A. Leemann,. Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete. *Mater Struct* 42, 2009, pp 71–82.
- [Lui, 2011] M. Liu, Incorporating ground glass in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* 25, 2011, pp 919–925.
- [Maia et al, 2012] L. Maia, J. Figueiras,. Early-age creep deformation of a high strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* 34, 2012, pp 602–610.

- [Maslehuddin et al, 1987] M. Maslehuddin, H. Saricimen, A. Al-Mani,. Effect of fly ash addition on the corrosion resisting characteristics of concrete. *ACI Mater J* 84(1), 1987, pp 42–50.
- [Mechaymech, 2005] A. Mechaymech, « Optimisation et performance de bétons autoplaçants économiques à base de différentes combinaisons d’adjuvants et de liants composés ». Université de Sherbrooke, 2005.
- [Meziani, 2009] M. Meziani,. « Effet de la micro silice sur le comportement mécanique, le retrait et la résistance à l’action des sulfates du béton autoplaçant ». Thèse de Magister, Université Abderrahmane mira-Bejaia 2009.
- [Meziani et al, 2012] M. Meziani, N. Chelouah,. Comportement des bétons autoplaçants : effet du type de l’addition minérale ». *Communication Science & technologie* N° 11, 2012.
- [Michel, 2009] M. Michel,. « Accélération de ciment au laitier par du ciment sulfo-alumineux » Thèse Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2009.
- [Mňahončáková et al, 2008] E. Mňahončáková, M. Pavlíková, S. Grzeszczyk, P. Rovnaníková, R. Černý,. Hydric, thermal and mechanical properties of self-compacting concrete containing different fillers. *Construction and Building Materials* 22, 2008 ; pp. 1594–1600.
- [Mohamed, 2011] M.A.S. Mohamed « Influence de la valorisation des microfibrilles végétales sur la formulation et la résistance aux cycles de gel-dégel de BAP ». Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2011.
- [Mokarema et al, 2005] D.W. Mokarema, R.E. Weyers, D.S. Lane,. Development of a shrinkage performance specifications and prediction model analysis for supplemental cementitious material concrete mixtures. *Cement Concrete Res* 35(5), 2005, pp 918–25.
- [Müller et al, 2012] H.S. Müller et M. Haist,. “Chapter 3: New Type of High Performance Concrete - Potentials for Innovations in concrete construction” *Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction*, 2012, pp 43-58.
- [Nacéri et al, 2006] A. Nacéri et I. Messaoudene, « Effet de l’activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier ». *Lebanese Science Journal* 7 (2), 2006.

[Najim et al 2012] K.B. Najim, M.R. Hall,. Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete. *Construction and Building Materials* 27, 2012, pp 521–530.

[Nassar et al, 2011] R. Nassar, P. Soroushian,. Strength and durability of recycled glass aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. *Construction and Building Materials* 29, 2012, pp 368-377.

[Nepomuceno et al, 2012] M. Nepomuceno, L. Oliveira, SMR. Lopes,. Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials* 26 (1), 2012, pp 317-326.

[Neville, 1995] A.M. Neville,. *Properties of Concrete*, 4th Ed. Pearson Education Limited, Essex, England, 1995.

[Neville, 2000] A.M. Neville, « Propriétés des bétons », édition Eyrolles, 824 pages. 2000.

[Okamura et al, 1994] H. Okamura, K. Ozawa,. *Self-compacting concrete*. International Workshop on High Performance Concrete, American Concrete Institute, Detroit 1994, pp 31-44.

[Ollivier et al, 2008] J.P. Ollivier, A. Vichot,. « La durabilité des bétons. Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement », Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 2008.

[Oudjit et al, 2011] M.N. Oudjit, M. Ould Ahmed, A. Bellal et K. Arroudj, « Comportement rhéologique et mécanique des mortiers à base d'ajouts cimentaires ». 8ème séminaire technique de Lafarge, Alger 2011, pp153-162.

[Pal et al, 2003] S. Pal, A. Mukherjee, S. Pathak,. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cem Concr Res* 33, 2003, 1481–6.

[Pane et al, 2002] I. Pane, W. Hansen,. Early age creep and stress relaxation of concrete containing blended cements. *Materials and Structures* 35, 2002, pp 92-96.

[Pathan et al, 2014] V.G. Pathan, G. Pathan, Feasibility and Need of use of Waste Marble Powder in Concrete Production. International Conference on Advances in Engineering & Technology, 2014, pp 23-26.

- [Persson, 2003] Persson, B., Internal frost resistance and salt frost scaling of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research* 33(3), 2003, pp 373-379.
- [Petersson et al, 1996] O. Petersson, P. Billberg and B.K. Van., A model for Self-compacting concrete. International Rilem Conference on “Production methods and workability of concrete”. RILEM Proceedings 32, 1996.
- [Pickett, 1942] G. Pickett, «The effect of change in moisture content on the creep of concrete under a sustained load », *J. of the Am. Concrete Inst* 38, 1942, p. 333–355.
- [Pons, 1998] G. Pons, « Caractérisation du comportement différé des bétons : de la réalité du matériau à la note de calcul ». *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées ; Spécial XX ;* pp 91-71 ; 1998.
- [Poppe et al, 2005] A. Poppe, and G. De Schutter, Creep and shrinkage of self compacting concrete. *RILEM Proceedings PRO 42*, 2005, pp. 329-336.
- [Powers, 1949a] T.C. Powers., A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete. *ACI, Journal of American Concrete Institute* 16(4), 1945, p. 245-272.
- [Powers, 1949b] T.C. Powers, The air requirement of frost-resistant concrete. in *Poc. Highway Res. Board*. 1949.
- [Powers et al, 1953] T.C. Powers, and R.A. Helmuth. Theory of volume changes in hardened Portland cement paste during freezing. in *Proc. Highway Res. Board*. 1953.
- [Rao et al, 2001] G.A. Rao, Long-term drying shrinkage of mortar —influence of silica fume and size of fine aggregate, *Cem. Concr. Res* 31 (2), 2001, pp 171–175.
- [Rompae, 2006] G. V. Rompae, « Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloruré ». Thèse : Université libre de Bruxelles, 2006, 372p.
- [Roux, 2008] S. Roux, « Evaluation des risques de biodégradation des bétons en contact avec une eau douce naturelle ». *INSA – Université Louis Pasteur, Strasbourg*, 2008.
- [Rozière et al, 2005] E. Rozière, P. Turcry, A. Loukili, Influence of paste volume, addition content and addition type on shrinkage cracking of self-compacting concrete, in: S.P. Shah (Ed.), *Proceedings of 2nd North American Conference on the Design and Use of Self-*

Consolidating Concrete (SCC) and the 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Chicago, 2005, pp. 945–951.

[Ruetz, 1968] Ruetz W. (1968) An hypothesis for the creep of the hardened cement paste and the influence of simultaneous shrinkage, Proceedings of the Structure of Concrete and its Behaviour under Load, Londres, pp. 365-387.

[Sahmaran et al, 2006] M. Sahmaran, H.A. Christianto, I.O. Yaman,. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. *Cem Concr Comp* 28(5), 2006, pp 432–40.

[Sahmaran et al, 2007] Sahmaran M, Yaman IÖ, Tokyay M. Development of high volume low-lime and high-lime fly-ash-incorporated self consolidating concrete. *Mag Concrete Res* 59(2), 2007, pp 97–106

[Sahmaran et al, 2009] Sahmaran M, Yaman IÖ, Tokyay M. Transport and mechanical properties of self-consolidating concrete with high volume fly ash. *Cement Concrete Comp* 31, 2009, pp 99–106.

[Sari et al, 1999] M. Sari, E. Prat, J.K. Labastire,. High strength self-compacting concrete-original solutions associating organic and inorganic admixtures. *Cement Concrete Research* 29(6), 1999, pp 813-818.

[Savadogo et al, 2015] N. Savadogo, A. Messan, K. Hannawi, F. Tsobnang, W.P. Agbodjan,. Durabilité d'un ciment composé à base de mâchefer de Tefereyre (Niger): absorption capillaire, porosité accessible à l'eau et attaque acide. *Journal of Materials and Engineering Structures* 2, 2015, pp 213–223.

[Schwarz et al, 2008] N. Schwarz, H. Cam & N. Neithalath,. Influence of fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cem Concr Comp* 30(6), 2008, pp 486 -496.

[Sellier et al, 2009] A. Sellier, L. Buffo-Lacarrière,. Toward a simple and unified modeling of basic creep shrinkage and drying creep for concrete. *Eur J of Environ and Civ Eng* 10, 2009, pp. 1161 1182.

- [Selvamony et al 2010] C. Selvamony, M. S. Ravikumar, S. U. Kannan and S. Basil Gnanappa,. Investigations on self-compacted self-curing concrete using limestone powder and clinkers. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* 5(3), 2010.
- [Seng et al, 2005] V. Seng, and H. Shima,. Creep and shrinkage of self-compacting concrete with different limestone powder contents. *RILEM Proceedings PRO 42*, 2005, pp 981-987.
- [Shakhmenko et al, 2010] G. Shakhmenko, A. Korjakins, G. Bumanis. Concrete with micro filler obtained from recycled lamp glass. *The 10th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques*, 2010, pp 280-284, Vilnius, Lithuania.
- [Shang et al, 2008] H.S. Shang, Y.P. Song, L.K. Qin,. Experimental study on strength and deformation of plain concrete under triaxial compression after freeze-thaw cycles. *Building and Environment* 43, 2008, pp 1197-1204.
- [Shang et al, 2012] H. S. Shang, T.H. Yi, Y.P. Song,. Behavior of plain concrete of a high water-cement ratio after freeze-thaw cycles. *Materials* 5, 2012, pp. 1698-1707.
- [Shao et al, 2000] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, D. Rodriguez,. Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 2000, pp 91–100.
- [Shen et al .2008] J. Shen, I. Yurtdas, C. Diagana & A. Li, « Une nouvelle méthode de formulation des bétons autoplaçants (BAP)», 2008.
- [Shi et al, 2005b] C. Shi, Y. Wu, C. Riefler & H. Wang,. Characterization and pozzolanic reactivity of glass powders, *Cement and Concrete Research* 35, 2005, pp 987-993.
- [Song et al, 2001] H.W. Song, K.J. Byun, S.H. Kim, D.H. Choi,. Early creep and shrinkage in self com-pacting concrete. Incorporating GGBFS, in: K. Ozawa, M. Ouchi (Eds.), *Proceedings of Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, 2001, pp. 413–422.
- [Su et al, 2001] N. Su, K.C. Hsu, H.W. Chani,. Simple mix-design method for self-compacting concrete. *Cement Concrete Composition*, 31 (12), 2001, pp 1799-1807.
- [Su et al, 2003] N. Su, B. Miao. A new method for mix design of medium strength flowing concretes with low cement content. *Cement Concrete Composition* 25, 2003, pp 215-222.

[Tamtsia et al, 2000] B. T. Tamtsia, J. J. Beaudoin, Basic creep of hardened cement paste: A re-examination of the role of water, *Cement and Concrete Research* 30, 2000, pp 1465-1475.

[Tazawa et al, 1995] Tazawa E., Miyazawa S., Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste. *Cement and Concrete Research* 25, 1995, pp 281-287,.

[Topcu et al, 2009] I.B. Topcu, T. Bilir and T. Uygunoglu,. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* 23, 2009, pp 1947–1953.

[Turcry, 2004] P. Turcry, « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2004.

[Turcry et al, 2005] P. Turcry, A. Loukili,. Cracking tendency of self-compacting concrete subjected to restrained shrinkage: experimental study and modeling. *ACI Mater J* 103, 2006, 272–9.

[Ulm et al, 1998] F.J. Ulm, P. Acker,. Le point sur le fluage et la recouvrance des bétons. *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées spécial XX*, 1998, pp. 73-82.

[Ulm et al, 1999] F.J. Ulm, F. Le Maou, C. Boulay,. Creep and shrinkage coupling: new review of some evidence. *Revue Française de Génie Civil* 3, 1999, pp. 21-37.

[Uysal et al, 2011a] M. Uysal, K. Yilmaz,. “Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete” *Cement & Concrete Composites* 33, 2011, pp 771–776.

[Uysal et al, 2011b] M. Uysal, M. Sumer,. Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *Construction and Building Materials* 25, 2011, pp 4112–4120.

[Valcuende et al, 2012] M. Valcuende, E. Marco, C. Parra, P. Serna,. Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete” *Cement and Concrete Research* 42(4), 2012, pp 583–592.

[Van et al, 1999] B.K. Van and D. Montgomery,. Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone. *Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7)*, Stockholm, Sweden, pp. 227-238, 13-15 septembre 1999.

- [Vejmelková et al, 2011] E. Vejmeková, M. Keppert, S. Grzeszczyk, B. Skaliński, R. Černý,. Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag. *Construction and Building Materials* 25(3), 2011, pp 1325–1331
- [Vikan et al, 2010] H. Vikan, T.A. Hammer and K.O. Kjellsen,. Drying Shrinkage of SCC – Influence of the Composition of Ternary Composite Cements. K.H. Khayat and D. Feys (eds.), *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete*, RILEM Book series 1, 2010.
- [Vuk et al, 2001] T. Vuk, V. Tinta, R. Gabrovec, V. Kaučič,. The effects of limestone addition, clinker type and fineness on properties of Portland cement. *Cem Concr Res* 31, 2001, pp 135–9.
- [Wittmann, 1982] F.H. Wittmann, « Creep and shrinkage of concrete structures, chapter Creep and shrinkage mechanisms », Londres, 1982.
- [Xie et al, 2002] Y. Xie, B. Liu, J. Yin, S. Zhou,. Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultra pulverized fly ash. *Cem Concr Res* 32, 2002, pp 477–80.
- [Yahia et al, 2005] A. Yahia, M. Tanimura, Y. Shimoyama,. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and w/c ratio. *Cem Concr Res* 35(3), 2005, pp 532–9.
- [Yazici, 2008] H. Yazici,. “The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete” *Construction and Building Materials* 22, 2008, pp 456–462.
- [Zeghichi, 2006] L. Zeghichi,. « Etude des bétons basiques a base des différents granulats. Thèse doctorat en sciences ». Université Mohammed Khider – Biskra, 2006.
- [Zeng et al, 2011] Q. Zeng, T. Fen-Chong, P. Dangla, K. Li,. A study of freezing behavior of cementitious materials by poromechanical approach. *International Journal of Solids and Structures* 48, 2011, pp 3267–3273
- [Zeroub, 2012] H. Zeroub. « Valorisation du verre dans l’élaboration de béton durable (Approche expérimentale) ». Mémoire de Magister, Université M’Hamed Bougara, Boumerdès, 2012.

[Zhu et al, 2005] W. Zhu, J.C. Gibbs,. Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research* 35, 2005, pp 1457– 1462.

RÉFÉRENCES NORMATIVES

ASTM C125: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. American Society for Testing Material, 2007.

ASTM C618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia; 2002.

ASTM C 666 : Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, American Society for Testing Material, 2015.

BAEL : " béton armé aux états limites ". Recueil des règles techniques françaises pour la conception et le calcul des ouvrages en béton armé suivant la méthode des états limites ; la dernière édition date de 1991.

BPEL : " béton précontraint aux états limites ". Recueil des règles techniques françaises pour la conception et le calcul des ouvrages en béton précontraint suivant la méthode des états limites ; la dernière édition date de 1991.

[EFNARC, 2002] EFNARC. Specification and guidelines for self-compacting concrete. UK: EFNARC; 2002.

EN 206-1 : Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité. Norme européenne, 2002.

NF P 18 325 : Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité.

NF P 18-508 : Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité, 2012.

NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, 2012.

NF P 18-555 : Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables. Norme française, 1990.

NF P 18-554 : Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux. Norme française, 1990.

NF P 18-598 : Granulats - Équivalent de sable. Norme française, 1990.

NF P 18-592 : Granulats - Essai au bleu de méthylène - Méthode à la tâche. Norme française, 1990.

NF P 18-545 : Granulats - Éléments de définition, conformité et codification, 2011. Norme française, 1990

NF P 18-573 : Granulats - Essai de Los Angeles. Norme française, 1990

NF P 18-572 : Granulats – Essai d'usure micro-Deval. Norme française, 1990.

NF EN 1744-1 : Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats - Partie 1 : analyse chimique. Norme française, 2014.

NF EN 197-1 : Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. Norme française, 2012.

NF EN 1008 : Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton. Norme française, 2003.

NFP18-404 : Bétons - Essais d'étude, de convenance et de contrôle - Confection et conservation des éprouvettes. Norme française, 1981.

NF P18-406 : Bétons - Essai de compression. Norme française, 1981.

NF P 18-353 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Mesure du pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aéromètre à béton. Norme française, 1985.

P 18-414 : Essai des bétons - essais non destructifs - mesure de la fréquence de résonance fondamentale. Norme française, 1994.

PN-B-06250 : Béton ordinaire. Norme Polonaise, 1988.

ANNEXE A : CALCUL DES INCERTITUDES

A.1. LA RESISTANCE A LA COMPRESSION

Les résultats de la résistance à la compression sont regroupés dans les tableaux A.1 et A.2.

Tableau A. 1 : Les résistances à la compression en (MPa) des bétons avec un rapport F/L = 0.1

		EP 1	EP 2	EP 3	Moy	Incertitude
FC	3 jours	31.41	31.7	36.18	33.09	1.54
	7 jours	35.27	36.24	49.12	40.21	4.46
	28 jours	46.95	47.1	60.34	51.46	4.43
	90 jours	69.16	40.03	52.75	53.98	4.39
PM	3 jours	24.97	27.04	28.04	26.68	0.90
	7 jours	37.21	53.17	58.96	49.78	6.50
	28 jours	39.5	55.99	65.59	53.69	7.61
	90 jours	50.37	62.61	66.66	59.88	4.89
PV	3 jours	35.46	36.37	37.06	36.29	0.46
	7 jours	46.24	46.53	46.6	46.45	0.11
	28 jours	48.32	51.04	53.55	50.97	1.51
	90 jours	59.84	65.6	71.33	65.60	3.31
LG	3 jours	24.95	26.35	28.25	26.51	0.95
	7 jours	46.06	49.96	52.1	49.37	1.76
	28 jours	43.33	67.73	71.87	60.97	8.90
	90 jours	67.26	67.6	69.06	67.97	0.55

Tableau A. 2 : Les résistances à la compression en (MPa) des bétons avec un rapport F/L = 0.2

		EP 1	EP 2	EP 3	Moy	Incertitude
FC	3 jours	29.8	31.33	33.44	31.52	1.05
	7 jours	30.31	33.01	37.62	33.64	2.13
	28 jours	38.78	40.71	42.51	40.66	1.07
	90 jours	43.61	45.42	46.78	45.2	0.92
PM	3 jours	19.78	22.02	26.46	22.75	1.96
	7 jours	32.98	35.3	39.52	35.93	1.91
	28 jours	39.02	40.76	42.2	40.66	0.91
	90 jours	41.34	43.51	44.72	43.2	0.98
PV	3 jours	24.71	25.67	25.85	25.41	0.35
	7 jours	31.3	35.77	37.6	34.89	1.87
	28 jours	46.02	49.58	51.35	48.98	1.56
	90 jours	52.69	54.35	57.86	54.9	1.52
LG	3 jours	26.96	28.77	32.01	29.25	1.48
	7 jours	38.35	43.01	43.68	41.68	1.68
	28 jours	56.23	57.74	62.03	58.67	1.74
	90 jours	63.95	65.83	69.62	66.47	1.67

A.2. LA RESISTANCE A LA TRACTION

Les résultats de la résistance à la traction des différents BAPs sont regroupés dans les tableaux A.3 et A.4.

Tableau A. 3: Les résistances à la traction en (MPa) des bétons avec un rapport F/L = 0.1

		EP 1	EP 2	EP 3	Moy	Incertitude
FC	3 jours	6.33	6.54	6.59	6.48	0.07
	7 jours	6.74	8.02	8.43	7.73	0.50
	28 jours	9.39	10.08	10.44	9.97	0.30
	90 jours	10.41	10.53	10.73	10.55	0.09
PM	3 jours	7.11	7.12	7.14	7.12	0.01
	7 jours	7.45	8.59	8.65	8.23	0.39
	28 jours	8.96	9	10.12	9.36	0.38
	90 jours	9.02	9.68	10.26	9.65	0.35
PV	3 jours	6.19	6.75	6.83	6.59	0.20
	7 jours	8.55	9.13	9.2	8.96	0.20
	28 jours	9.23	9.6	9.66	9.49	0.13
	90 jours	9.68	9.98	10.78	10.14	0.32
LG	3 jours	6.96	7.37	7.93	7.42	0.28
	7 jours	7.81	8.61	9.15	8.52	0.38
	28 jours	8.69	9.34	9.93	9.32	0.35
	90 jours	9.17	9.69	10.44	9.76	0.38

Tableau A. 4 : Les résistances à la traction en (MPa) des bétons avec un rapport F/L = 0.2

		EP 1	EP 2	EP 3	Moy	Incertitude
FC	3 jours	5.65	5.76	5.81	5.74	0.04
	7 jours	6.442	6.543	6.763	6.58	0.09
	28 jours	8.92	8.76	9.39	9.02	0.19
	90 jours	9.28	9.63	9.76	9.56	0.14
PM	3 jours	6.16	6.02	6.32	6.17	0.08
	7 jours	5.94	6.37	6.74	6.35	0.23
	28 jours	8.33	9.67	9.92	9.31	0.49
	90 jours	9.26	9.622	9.766	9.55	0.15
PV	3 jours	5.94	5.97	6.39	6.1	0.14
	7 jours	7.52	7.979	8.25	7.92	0.21
	28 jours	9.37	9.99	10.43	9.93	0.31
	90 jours	10.15	10.7	11.02	10.62	0.25
LG	3 jours	4.99	6.67	7.84	6.5	0.83
	7 jours	8.11	8.5	10.07	8.89	0.60
	28 jours	9.35	9.51	10.86	9.91	0.48
	90 jours	9.73	10.01	11.48	10.41	0.54

A.3. LA RETRAIT

Les résultats du retrait total et endogène à 150 jours des différents BAPs sont présentes dans les tableaux A.5 et A.6.

Tableau A. 5 : Les résultats du retrait en ($\mu\text{m}/\text{m}$) des bétons avec un rapport $F/L = 0.1$

		EP 1	EP 2	EP 3	Moy	Incertitude
FC	Total	921.43	767.86	907.14	865.48	48.98
	Endogène	667.86	589.29	539.29	598.81	37.42
PM	Total	900	957.14	928.57	928.57	16.49
	Endogène	796.43	617.86	682.14	698.81	52.22
PV	Total	792.86	700	732.14	741.67	27.23
	Endogène	460.71	539.29	553.57	517.86	28.87
LG	Total	735.71	721.43	853.57	770.24	41.87
	Endogène	621.43	632.14	750	667.86	41.19

Tableau A. 6 : Les résultats du retrait en ($\mu\text{m}/\text{m}$) des bétons avec un rapport $F/L = 0.2$

		EP 1	EP 2	EP 3	Moy	Incertitude
FC	Total	625	567.86	660.71	617.86	27.04
	Endogène	275	346.43	232.14	284.52	33.33
PM	Total	478.57	635.71	535.71	550	45.92
	Endogène	392.86	392.86	467.86	417.86	25
PV	Total	450	553.57	467.86	490.48	31.97
	Endogène	292.86	310.71	321.43	308.33	8.33
LG	Total	667.86	707.14	610.71	661.90	27.99
	Endogène	396.43	407.14	457.1286	420.24	18.71

A.4. LA PERTE EN POIDS

Les résultats de la perte en poids à 150 jours des différents BAPs sont présentes dans les tableaux A.7 et A.8.

Tableau A. 7 : Les résultats de la perte en poids en (%) des bétons avec un rapport $F/L = 0.1$

	EP 1	EP 2	EP 3	Moy	Incertitude
FC	3.55	3.48	3.39	3.47	0.05
PM	3.15	3.40	3.32	3.29	0.07
PV	2.61	2.75	2.45	2.61	0.09
LG	2.32	2.45	2.68	2.48	0.11

Tableau A. 8 : Les résultats de la perte en poids en (%) des bétons avec un rapport F/L = 0.2

	EP 1	EP 2	EP 3	Moy	Incertitude
FC	2.98	3.29	3.49	3.26	0.15
PM	3.47	3.52	3.49	3.49	0.02
PV	3.48	3.64	3.19	3.44	0.13
LG	3.29	3.24	2.76	3.10	0.17

ANNEXE B : CONSIDERATION DU RETRAIT ET FLUAGE DANS LES CODES OU REGLEMENTS

B.1. LA CONSIDERATION DU RETRAIT DANS L'EUROCODE 2.

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

➤ RETRAIT TOTAL

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

La déformation totale de retrait peut être calculée par la relation suivante :

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} \quad \text{Equation (1)}$$

Où :

ϵ_{cs} : La déformation totale de retrait

ϵ_{cd} : La déformation due au retrait de séchage

ϵ_{ca} : La déformation due au retrait endogène.

Notons par ailleurs que le retrait s'exprime en μm ou en $\mu\text{m}/\text{m}$ (10 m/m).

➤ PREDICTION DU RETRAIT DE SECHAGE

Les valeurs de l'expression (1) dépendent de nombreux paramètres, parmi lesquels, bien entendu, le temps. L'évolution du retrait de séchage est donnée par l'expression suivante :

$$\varepsilon_{cs}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad \text{Equation (2)}$$

Où :

$\beta_{ds}(t, t_s)$: Une fonction qui traduit l'évolution dans le temps du retrait de séchage (β_{ds} vaut 1 pour le calcul de la valeur finale du retrait). Cette fonction dépend de h_0 tandis que t_s représente la durée de la cure et (t, t_s) le temps de séchage.

k_h : Un coefficient dépendant du rayon moyen h_0 .

$\varepsilon_{cd,0}$: La valeur nominale du retrait de séchage.

Notons que la classe de résistance du ciment peut induire une augmentation de près de 60 % du retrait en fonction de la résistance.

➤ PREDICTION DU RETRAIT ENDOGENE

La déformation due au retrait endogène peut quant à elle se calculer par l'expression suivante:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{ds}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) \quad \text{Equation (3)}$$

Où :

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$$

$$\beta_{ds}(t) = 1 - \text{Exp}(-0,2 \cdot t_{0,5}), \text{ avec } t \text{ exprimé en jours.}$$

f_{ck} représente la résistance caractéristique en compression du béton, mesurée sur cylindre de 150 mm de diamètre et de 300 mm de hauteur à 28 jours.

Le retrait endogène est d'autant plus grand que le facteur E/C est faible et donc que sa résistance en compression f_{ck} est élevée. Cette influence est exacerbée pour les bétons présentant un haut dosage en ciment. Alors que le rapport E/C réel n'est pas toujours connu du concepteur, la résistance en compression du béton est quant à elle un choix du bureau d'étude. C'est ce dernier paramètre, pragmatique, qui permet de prédire la valeur finale du retrait endogène selon l'Eurocode 2.

➤ CALCUL DETAILLE DE $\varepsilon_{ca,0}$ ET β_{ds}

Le calcul détaillé de $\varepsilon_{ca,0}$ est le suivant :

$$\varepsilon_{ca,0} = 0,85 [(220 + 110 \alpha_{ds1}) \cdot \text{Exp}(-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm}/10) \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}]$$

Dans cette formule :

$$\beta_{RH} = 1,55. [1-(RH /RH_0)^3]$$

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

α_{ds1} : Un coefficient qui tient compte du type de ciment. Ce coefficient vaut :

- 3 pour les ciments lents (classe S : 32,5 N),
- 4 pour les ciments normaux (classe N : 32,5 R – 42,5 N)
- 6 pour les ciments rapides (classe R : 42,5 R – 52,5 N – 52,5 R)

α_{ds2} : Un coefficient qui tient compte du type de ciment. Ce coefficient vaut

- 0,13 pour les ciments de classe S,
- 0,12 pour les ciments de classe N,
- 0,11 pour les ciments de classe R.

RH : L'humidité relative ambiante (%)

RH_0 : L'humidité relative ambiante de référence (100 %).

h_0 : Le rayon moyen de la section. Celui-ci est égal à $2A_c/u$, où A_c représente l'aire de la section de béton et u le périmètre de la partie de la section exposée au séchage.

L'évolution dans le temps du retrait de séchage se traduit par la formule suivante :

$$B_{ds}(t, t_s) = (t - t_s) / [(t - t_s) + 0,04\sqrt{h_0^3}]$$

t : L'âge du béton à l'instant considéré (jours)

t_s : L'âge du béton (jours) au début du retrait de séchage (ou gonflement).

B.2. LA CONSIDERATION DU FLUAGE DANS LES CODES

Il existe plusieurs modèles pratiques pour l'estimation des déformations de fluage.

Les modèles sont différents par leurs degrés de précision et aussi par la simplicité de leurs formulations.

Nous donnerons par la suite, un aperçu rapide sur les modèles réglementaires suivants :

- Modèle de l'Eurocode 2.
- Modèle de BPEL (99).

B.2.1. LA CONSIDERATION DU FLUAGE DANS L'EUROCODE 2.

Le modèle de fluage européen Euro-code 2 est réglementairement, le code de calcul à appliquer à tout élément en béton plein à l'armé dans des conditions d'états limites de service en France (Norme NF P18-711-A, 1992). Pour les structures courantes, la vérification des déformations différées de fluage et de retrait ne semble pas toujours nécessaire. A l'inverse, lorsqu'il s'agit de structures particulièrement sensibles aux mécanismes différés, ces règles de calcul ne semblent pas toujours suffisantes (Article 2.5.1.5, AFNOR 2, 1992) [I. Bal, 2009].

- Limite d'application du modèle
 - $12/15 \text{ MPa} \leq f_c \leq 50/60 \text{ MPa}$
 - $\sigma \leq 45\% \times f_c$
 - $40\% \leq RH \leq 100\%$
 - Durée minimale de la cure du béton : $t_0 \geq 0.5 \text{ jour}$
 - Température moyenne : $T = 10 \text{ à } 20 \text{ }^\circ\text{C}$

La déformation totale du béton $\varepsilon(t)$ inclut la déformation sous charge $\varepsilon_c(t)$ et les déformations induites hors chargement (retrait $\varepsilon_{sh}(t)$ ou effet thermique $\varepsilon_{th}(t)$).

➤ *Déformation de fluage*

La déformation de fluage $\varepsilon_{fl}(t)$ est obtenue d'après le coefficient de fluage $\varphi(t, t')$ et la raideur tangente conventionnelle à 28 jours du béton E_{i28} .

$$\varepsilon_{fl}(t) = \frac{\varphi(t, t')}{E_{i28}} \sigma(t) \quad \text{Equation (1)}$$

Le coefficient de fluage $\varphi(t, t')$ peut se calculer de la manière suivante :

$$\varphi(t, t') = \varphi_0 \times \beta_c(t - t') \quad \text{Equation (2)}$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \times \beta(f_c) \times \beta(t') \quad \text{Equation (3)}$$

Avec :

$\varphi(t, t')$: Coefficient de fluage, correspondant au fluage entre les instants t' et t .

φ_0 : Coefficient de fluage fictif donné par l'équation (3)

β_c : Coefficient définissant le développement du fluage dans le temps, après mise en charge.

t : Âge du béton, en jours, à l'instant considéré

t' : Âge du béton, en jours, lors de la mise en charge.

φ_{RH} : est un facteur prenant en compte l'effet de l'humidité relative sur le coefficient de fluage fictif.

Le facteur φ_{RH} tient compte de l'humidité relative HR en fonction du rayon moyen de la pièce h_0 .

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1-RH/10}{0,10 \times \sqrt[3]{h_0}} \quad \text{pour } \bar{f}_c \leq 35 \text{ MPa} \quad \text{Equation (4)}$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1-RH/100}{0,10 \times \sqrt[3]{h_0}} \times \alpha_1 \right] \times \alpha_2 \quad \text{pour } \bar{f}_c > 35 \text{ MPa} \quad \text{Equation (5)}$$

α_1, α_2 sont deux coefficients fonction de la résistance du béton.

h_0 : Le rayon moyen de la pièce (en mm) qui est calculé par le rapport de la section transversale A_c sur le périmètre en contact avec l'air ambiant u . $h_0 = 2 \times A_c / u$.

Les deux paramètres $\beta(\bar{f}_c)$ et $\beta(t')$ sont respectivement liés à la résistance du béton \bar{f}_c et l'âge du béton au moment du chargement t' .

$$\beta(\bar{f}_c) = \frac{16,8}{\sqrt{\bar{f}_c}} \quad \text{Equation (6)}$$

$$\beta(t') = \frac{1}{0,1+(t')^{0,2}} \quad \text{Equation (7)}$$

$$\beta(t-t') = \left[\frac{(t-t')}{\beta_H+(t-t')} \right]^{0,3} \quad \text{Equation (8)}$$

Avec β_H un coefficient lié à l'humidité relative et au rayon moyen de l'élément de béton.

$$\beta_H = 1,5 \times [1 + (0,012 \times RH)^{18}] \times h_0 + 250 \quad \text{Equation (9)}$$

Avec $\beta_H \leq 1500$ pour $f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$

$$\beta_H = 1,5 \times [1 + (0,012 \times RH)^{18}] \times h_0 + 250 \times \alpha_3 \quad \text{Equation (10)}$$

Avec $\beta_H \leq 1500 \times \alpha_3$ pour $f_{cm} > 35$ MPa

α_3 : un coefficient relatif à la résistance du béton.

Les coefficients α_1 , α_2 , α_3 pondèrent les valeurs des facteurs φ_{RH} et β_H en fonction de la résistance du béton [Comité Européen de Normalisation, 2001 (Annexe A)].

$$\alpha_1 = [35/f_{cm}]^{0,7} \quad \alpha_2 = [35/f_{cm}]^{0,2} \quad \alpha_3 = [35/f_{cm}]^{0,5}$$

Le type de ciment peut influencer la raideur du matériau en fonction de sa vitesse de prise. Un exposant α est alors introduit pour rétablir l'âge t' du béton.

$$t' = \left[1 + \frac{9}{2+(t')^{1,2}} \right]^\alpha \times t' \quad \text{avec } t' \geq 0,5 \text{ jour}$$

Ou : $\alpha = -1$ Pour les ciments à prise lente (S).

$\alpha = 0$ Pour les ciments à prise normale ou rapide (N ou S)

$\alpha = 1$ Pour les ciments à prise rapide et haute résistance (RS)

➤ *Déformation de retrait*

La déformation de retrait $\varepsilon_{sh}(t)$ est initiée au terme de la cure au temps t_0 Equation (11). Son expression est fonction d'un coefficient de retrait fictif ε_{cso} défini par Equation (12) et d'une fonction d'évolution du retrait au cours du temps $\beta_s(t-t_0)$ défini par Equation (14).

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{cso} \times \beta_s(t - t_0) \quad \text{Equation (11)}$$

La déformation de retrait fictif ε_{cso} dépend de multiples facteurs. Le terme $\varepsilon_s(f_{cm})$ considère l'influence de la résistance du béton sur le retrait Equation (13) ; β_{sc} caractérisant le type de ciment. Quant au terme β_{RH} , il prend compte l'humidité relative du milieu ambiant RH.

$$\varepsilon_{cso} = \varepsilon_s(f_{cm}) \times \beta_{RH} \quad \text{Equation (12)}$$

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = [160 + \beta_{sc} \times (90 - f_{cm})] \times 10^{-6} \quad \text{Equation (13)}$$

Avec :

$\beta_{sc} = 4$ Pour les ciments à prise lente (S).

$\beta_{sc} = 5$ Pour les ciments à prise normale ou rapide (N ou S)

$\beta_{sc} = 8$ Pour les ciments à prise rapide et haute résistance (RS)

$\beta_{RH} = -1,55 \times \beta_{sRH}$ Pour $40\% \leq RH < 99\%$ (Stockage en air)

$\beta_{RH} = 0,25$ Pour $RH \geq 99\%$ (Immersion dans l'eau)

avec $\beta_{sRH} = 1 - (RH/100)^3$

La fonction d'évolution du retrait $\beta_s(t-t_0)$ est reliée au rayon moyen de l'élément h_0 en fonction de la durée de retrait $(t-t_0)$.

$$\beta_s(t - t_0) = \left[\frac{(t-t_0)}{0,035 \times (h_0)^2 + (t-t_0)} \right]^{1/2} \quad \text{Equation (14)}$$

B.2.2. LA CONSIDERATION DU FLUAGE DANS LE BPEL 91.

Le modèle de fluage du règlement de Béton Précontraint aux Etat Limites [BPEL91, 1999] est largement employé en France. Les nombreuses structures construites avec ce mode de construction admettent une forte proportion des contraintes maintenues constantes. De larges déformations de fluage apparaissent au sein d'ouvrages en béton précontraint qui représentent généralement des structures non courantes [BPEL91, 1999].

➤ Déformation de fluage

La déformation de fluage $\varepsilon_{fl}(t)$ est calculée sur la base de la déformation instantanée conventionnelle à 28 jours ε_{ic} (équation 2) et du coefficient de fluage $\varphi(t, t')$ (équation 3).

$$\varepsilon_{fl}(t) = \varepsilon_{ic} \varphi(t, t') \quad \text{Equation (1)}$$

$$\varepsilon_{ic} = \frac{\sigma(t)}{E_{i2}} \quad \text{Equation (2)}$$

$$\varphi(t, t') = k_{fl}(t') f(t - t') \quad \text{Equation (3)}$$

Le coefficient de fluage $\varphi(t, t')$ résulte de produit du coefficient de fluage K_{fl} (équation 4)

avec une fonction de fluage $f(t, t')$ qui quantifie l'amplitude de la déformation en fonction de la durée de maintien de chargement (t, t') (équation 5).

$$K_{fl}(t') = k_s[k_e + k_c \times k(t')] \quad \text{Equation (4)}$$

$$f(t - t') = \frac{(t-t')^{1/2}}{(t-t')^{1/2} + 5\sqrt{r_m}} \quad \text{Equation (5)}$$

E_{i28} est le module de raideur tangent conventionnelle à 28 jours du béton et r_m , est le rayon moyen de l'élément béton(en cm).

Les multiples facteurs de coefficient de fluage $k_{fl}(t)$ représentent :

- Pour k_s , une fonction de ratio ρ_s de la section d'acier longitudinal par rapport à la section transverse de béton.
- Pour k_e , la limite inférieure de coefficient de fluage du béton à long terme (non armé).
- Pour k_c , la considération des conditions ambiantes $\rho_h\%$ et de la taille de la pièce (r_m).
- Pour $k(t')$, la prise en compte de mûrissement à l'âge du béton au chargement t' (en jours).

$$k_s = \frac{1}{1 + 20 \rho_s} \quad \text{Equation (6)}$$

$$\rho_s = A_l/B_l \quad \text{Equation (7)}$$

Remarque : s'il s'agit d'un béton sans armatures, $\rho_s = 0$ et $k_s = 1$. $k_e = 0.40$

$$k_c = \frac{120 - \rho_h}{30} + \frac{2}{3} \times \frac{100 - \rho_h}{20 + r_m} \quad \text{Equation (8)}$$

$$k(t') = \frac{100}{100 + t'} \quad \text{Equation (9)}$$