

Université 20Aout 1955-Skikda

Faculté de Technologie

Département : Génie Civil

Ref : D012118016D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم : الهندسة المدنية

المرجع: D012118016D

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

En Génie Civil

Option : Géo-matériaux

Effets de l'interaction ciment-polyadditions-adjuvant sur les propriétés des bétons

Présentée par : **KHERRAF Leila**

Soutenue publiquement le 02/07/2018

Devant le jury composé de :

Président	MESSAST Salah	Professeur	Université de Skikda
Rapporteur	BELACHIA Mouloud	Professeur	Université de Skikda
Examineurs	CHERAIT Yacine	Professeur	Université de Guelma
	NAFA Zahreddine	Professeur	Université de Guelma
Invitée	HEBHOUB Houria	M.C.A	Université de Skikda

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu de nous avoir donné le courage et la volonté de pouvoir poursuivre ce travail.

Je remercie chaleureusement tous ceux qui, par leur aide et leurs encouragements, m'ont permis de réaliser cette étude.

Mes plus vifs remerciements s'adressent :

À mon Directeur de thèse Monsieur le Pr BELACHA Mouloud, pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ma thèse ainsi que pour le temps qu'il m'a consacré :

À Monsieur le Pr MESSAST Salah qui a accepté d'être le président du jury :

Aux membres de Jury, Monsieur le Pr CHERAT Yacine et Monsieur le Pr NAFA Zahreddine. Je leur suis reconnaissante d'avoir accepté de juger ce travail en effectuant un examen attentif de cette thèse:

Je tiens à remercier tout particulièrement Mme le Dr HACHOUB Houria qui m'a toujours soutenue et m'a fait profiter de son enthousiasme et de la franchise de ces critiques sur la façon de mener à terme ce travail.

Je ne saurais oublier mes collègues ABDELWAHAD Assia, SEBBAH Toufik et BELHADJ Zine eddine.

Ainsi que ZAABAT Ammar et le Pr BOUABAZ Mohamed :

Un grand merci enfin à toute l'équipe du laboratoire LHC et de la cimenterie de Hadjar essoud pour l'accueil qu'elles m'ont réservé et l'ambiance dans laquelle ce travail a été réalisé.

L. KHERRAF

Dédicaces

À la mémoire de celui et celle qui sont partis trop tôt :

Mon père & Ma mère.

À ma nièce et mes neveux.

À toutes mes Amies

Résumé

De nos jours, le secteur de la construction en Algérie connaît un essor considérable en matière de réalisation des bâtiments et des infrastructures. La production des granulats pour bétons s'accompagne d'un excès de fines calcaires. Ces fillers non exploités entraînent une pollution physique et esthétique de l'environnement. Leur incorporation dans le béton est une approche prometteuse pour les valoriser.

Dans ce travail, nous avons étudié en premier lieu l'influence de l'incorporation combinée de filler calcaire ou/et la pouzzolane naturelle, le laitier granulé sur les propriétés à l'état frais et sur la résistance en compression des bétons fabriqués tout d'abord sans adjuvant puis avec un superplastifiant à base de carboxylates. Le filler calcaire est incorporé avec des pourcentages différents (10, 15 et 20) en tant que remplacement partiel du ciment portland. Ensuite cinq combinaisons ont été préparées à partir du mélange à 20% de filler calcaire en substituant deux pourcentages (5 et 10) de fillers calcaire par la pouzzolane naturelle ou le laitier granulé respectivement. Le dernier mélange a été composé à base de 10% de filler calcaire et 5% de chacune de ces deux additions. En second lieu, le filler calcaire inclus dans la composition référentielle du béton autoplaçant a été substitué partiellement par la poussière de four de ciment et par la poudre de verre respectivement avec des taux de 3.75%, 7.5 et 11.25 successivement.

Les résultats obtenus ont montrés que la combinaison de 15% de filler calcaire et 5% du laitier granulé donne pour un béton ordinaire avec des performances comparables à celle du béton témoin. Cependant l'incorporation de 10% fillers calcaire avec 0.5% d'adjuvant dans la composition du béton conventionnel a présenté des caractéristiques satisfaisantes en matière de plasticité et de résistance mécanique. Quant au béton autoplaçant, la combinaison à 3.75% filler calcaire et 11.25% de poussière de four présente les meilleures résistances mécaniques à tous les âges (1, 14 et 28 jours).

Mots clés : Filler calcaire, Laitier granulé, Pouzzolane naturelle, Poussière de four de ciment, Poudre de verre, Béton superplastifié , Béton autoplaçant , Addition Combinée.

Abstract

Nowadays, the sector of construction in Algeria is witnessing a considerable evolution in terms of buildings and infrastructures. The production aggregates for concretes is accompanied by a production of fines. The fine excess, which is not exploited cause a physical and aesthetic pollution of the environment. Their incorporation in concretes proves to be a promising approach to value them.

This work aims to study , in first, the influence of the combined incorporation of limestone and/or natural pozzolana and granulated blast-furnace slag on the properties in fresh state and on the mechanical strength of the concretes manufactured first of all without additives then with one superplasticizer containing polycarboxylate. The limestone filler is incorporated with different percentages (10, 15 and 20) as a partial replacement of Portland cement. Then, five combinations were prepared by starting from the mixture with 20% limestone filler as well as by substituting two percentages (5 and 10) of limestone filler with natural pozzolana or granulated slag. The last mixture was composed of 10% limestone filler and 5% of each of these two mineral additions. Secondly, the limestone filler included in the reference composition of the self-compacting concrete was partially replaced by the cement kiln dust and the glass powder respectively with rates of 3.75%, 7.5 and 11.25 successively.

The obtained results showed that, at 28 days, the combination of 15% limestone filler and 5% granulated slag gives, for ordinary concrete, a comparable performance to that of control concrete. However, the incorporation of 10% limestone filler with 0.5% of superplasticizer in the control mixture has shown satisfactory characteristics in terms of plasticity and mechanical strength. For self-compacting concrete, the combination of 3.75% limestone filler and 11.25% oven dust has the best mechanical resistance at all ages (1, 14 and 28 days).

Keywords: Limestone Filler, Granulated Blast-Furnace Slag, Natural Pozzolana , Kiln Dust Cement, Glass powder, Superplasticized concrete, Self- compacting concrete, Combined Additions.

الملخص

في الوقت الحاضر ، يشهد قطاع البناء في الجزائر تطوراً كبيراً من حيث انجاز المباني والبنى التحتية. و يرافق انتاج الحصى المستعمل في خرسانة البناء إنتاج كمية زائدة من الدقائق، التي اذا لم يتم استغلالها تسبب تلوثاً مادياً وجمالياً للبيئة و ادخالها في تركيبة الخرسانة يعد نهج واعد لتقييمها. يهدف هذا البحث في البداية إلى دراسة تأثير الدمج المشترك للحجر الجيري و / أو البوزلان الطبيعي وخبث الافران العالية المحبب على الخواص في الحالة المائعة وعلى المقاومة الميكانيكية للخرسانة المصنعة أولاً وقبل كل شيء بدون إضافات ثم مع الملدن المتفوق من نوع polycarboxylate. حيث تم دمج حشوة الحجر الجيري بنسب مختلفة (10% ، 15% و 20%) كبديل جزئي للأسمنت البورتلاندي. بعد ذلك ، تم تحضير خمس تركيبات من خلال الخليط الذي يحتوي على نسبة 20% من الحجر الجيري باستبدال اثنين من النسب المئوية (5 و 10) من حشو الحجر الجيري بالبوزلان الطبيعي أو الخبث المحبب. اما الخليط الأخير فيتكون من 10% من حبيبات الحجر الجيري و 5% من كلتا هاتيه الإضافات المعدنية. ثانياً ، تم استبدال جزئياً حشوة الحجر الجيري المتضمنة في التركيبة المرجعية للخرسانة ذاتية القوية بغبار فرن الأسمنت ومسحوق الزجاج على التوالي بمعدلات 3.75%، 7.5% و 11.25%.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنه خلال 28 يوماً ، فإن تركيبة 15% من حبيبات الحجر الجيري و 5% من الخبث المحبب تعطي ، بالنسبة للخرسانة العادية ، أداءً مشابهاً للخرسانة المرجعية . و دمج حشوة الحجر الجيري بنسبة 10 % مع 0.5 % من الملدن المتفوق في الخليط المجعي أظهر خصائص مرضية من حيث القابلية للتشغيل والمقاومة الميكانيكية. اما بالنسبة للخرسانة ذاتية القوية ، فإن الجمع بين حشو الحجر الجيري بنسبة 3.75% وغبار الفرن بنسبة 11.25% يتمتع بأفضل مقاومة ميكانيكية في جميع الأعمار 1 و 14 و 28 يوماً.

الكلمات المفتاحية : ملدن متفوق ، دقائق الحجر الجيري ، خبث الافران العالية المحبب ، البوزلان الطبيعي ، غبار فرن الأسمنت، مسحوق الزجاج ، خرسانة ملدنة ، خرسانة ذاتية القوية، إضافات مجتمعة.

Table des matières

RESUME.....	i
ABSTRACT.....	ii
ملخص	iii
TABLE DES MATIERES	iv
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES PHOTOS	xiii
LISTE DES ABREVIATIONS.....	xiv
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : NOTIONS SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRES & LES BETONS	4
I.1. Introduction	4
I.2. Le ciment portland	4
I.2.1. Définition	4
I.2.2. Composition chimique du ciment Portland	4
I.2.2.1. Les phases du clinker	5
I.2.2.2. Les sulfates de calcium	7
I.2.2.3. Les éléments mineurs	7
I.2.3. Hydratation du ciment Portland	7
I.2.3.1. Hydratation des silicates.....	8
I.2.3.2. Hydratation des aluminates	9
I.2.4. Paramètres influençant la qualité du ciment Portland	10
I.3. Les additions minérales.....	11
I.3.1. Définition et normalisation des additions	11
I.3.1.1. Les additions calcaires	12
I.3.1.2. Les laitiers de hauts fourneaux	13
I.3.1.3. Les pouzzolanes naturelles	16
I.3.2. Les additions non normalisées	17
I.4. Les polyadditions minérales	17
I.5. Les déchets	17
I.5.1. La poudre de verre.....	18
I.5.2. La poussière du four de la cimenterie	19
I.6. Les adjuvants	20
I.6.1. Définition	20
I.6.2. Adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau	20
I.6.3. Mode d'action des superplastifiants.....	20
I.6.3.1. La répulsion électrostatique.....	21
I.6.3.2. La répulsion stérique	22

I.6.4. Facteurs influençant l'efficacité des superplastifiants.....	22
I.6.5. Compatibilité entre le superplastifiant et le ciment.....	23
I.7. Le bétons ordinaire et ses qualités essentielles.....	24
I.7.1. Définition.....	24
I.7.2. La structure du béton.....	24
I.7.2.1. La matrice liante.....	24
I.7.2.2. Les granulats.....	25
I.7.3. Formulation des bétons ordinaires.....	28
I.7.4. Propriétés d'un béton ordinaire.....	28
I.7.4.1. Propriétés du béton frais.....	28
I.7.4.2 Propriétés du béton durci.....	30
I.8. Les bétons autoplaçants.....	31
I.8.1. Définition.....	31
I.8.2. La structure des BAP.....	31
I.8.3. Propriétés des BAP à l'état frais.....	32
I.8.4. Concept du béton auto plaçant.....	32
I.8.4.1. Une quantité de fines importante.....	32
I.8.4.2. Un volume de pâte élevé.....	32
I.8.4.3. Utilisation d'adjuvant (superplastifiant).....	33
I.8.4.4. Éventuelle utilisation d'un agent de viscosité.....	33
I.8.4.5. Un faible volume de gravillon.....	34
I.8.5. Caractérisation des bétons à l'état frais.....	34
I.8.6. Propriétés des BAP à l'état durci.....	34
I.8.7. Formulation des BAP.....	35
I.8.8.Exemples des méthodes de formulations des BAP.....	35
I.8.8.1. La méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires.....	35
I.8.8.2. La méthode basée sur l'optimisation du mortier (méthode japonaise).....	36
I.9. Conclusion.....	37

CHAPITRE II : ACTIONS DES ADDITIONS MINERALES ET DES SUPERPLASTIFIANTS DANS LES MATERIAUX A MATRICE CIMENTAIRE 39

II.1. Introduction.....	39
II.2. Effets des additions minérales dans les matériaux à matrice cimentaire.....	39
II.2.1. Effet granulaire.....	40
II.2.2. Effet physico-chimique et microstructural.....	41
II.2.3. Effet chimique.....	41
II.2.3.1 La réaction pouzzolanique.....	41
II.2.3.2 L'activité hydraulique.....	41
II.3. Effet des carboxylates sur les propriétés des ciments, des mortiers et des bétons.....	42
II.4. Présentation de cas de l'étude.....	42
II. 4.1. Effets du filler calcaire sur les propriétés des ciments , des mortiers et des bétons courants.....	43
II. 4.1.1. Action du filler calcaire seul.....	43

II. 4.1.2. Mécanisme de l'action du filler calcaire seul	44
II. 4.1.3. Paramètres influençant l'action du filler calcaire	44
II. 4.1.4. Action combinée du filler calcaire et du superplastifiant	46
II. 4.2. Effets du laitier de haut fourneaux sur les propriétés des mortiers et des bétons courants.....	47
II. 4.2.1. Action du laitier seul	47
II. 4.2.2. Mécanisme d'action du laitier seul	48
II. 4.2.3. Paramètres influençant l'action du laitier de haut fourneau	49
II. 4.2.4. Action combinée du laitier et du calcaire	53
II. 4.3. Effets de la pouzzolane naturelle sur les propriétés des des ciments, mortiers et des bétons courants.....	54
II. 4.3.1. Action de la pouzzolane seul	54
II. 4.3.2. Mécanisme d'action de la pouzzolane naturelle	54
II. 4.3.4. Action de la pouzzolane combinée au calcaire et /ou superplastifiant	57
II. 4.4. L'utilisation combinée des additions minérales	58
II. 4.4.1. L'utilisation sans adjuvants	58
II. 4.4.2. L'utilisation avec superplastifiant	59
II. 4.5. Influence de poudre de verre dans la formulation du béton autoplaçant	60
II. 4.6. Influence de la poussière du four de ciment dans les BAP.....	63
II. 4.7. Influence du filler calcaire sur les propriétés du béton autoplaçant.....	66
II. 4.8. Valorisation des fillers issus de concassage des roches calcaires	67
II.5 Conclusion	68

CHAPITRE III : MATERIAUX, METHODES EXPERIMENTALES ET TECHNIQUES D'ANALYSE

III.1. Introduction.....	70
III.2. Identification et caractérisation des matériaux de base utilisés	70
III.2.1 Ciment (C).....	70
III.2.2. Les additions minérales	72
III.2.2.1. Filler calcaire (FC)	72
III.2.2.2. Laitier granulé (LG)	74
III.2.2.3. Pouzzolane naturelle (PN)	75
III.2.2.4. La poudre de verre (PV)	76
III.2.2.5. La poussière de four de cimenterie (CKD)	77
III.2.3. Eau de gâchage	78
III.2.4. Adjuvant	79
III.2.5. Granulats	79
III.2.5.1. Sable normalisé	79
III.2.5.1. Graviers et sables	80
III.3. Méthodologie d'étude	84
III.3. 1. Sous plan 1 :	85
III.3. 2. Sous plan 2	85
III.4. Proportions des constituants des mélanges.....	87

III.4. 1. Sous plan 1	87
III.4. 1. Sous plan 2	88
III.5. Méthodes de formulation adoptées	88
III.5. 1. Méthode de formulation des bétons ordinaires	88
III.5. 1. 1. Les étapes de formulation	88
III.5. 1. 2. Formulation du béton ordinaire témoin	88
III.5. 2. Méthode de formulation des bétons superplastifiés	89
III.5. 3. Méthode de formulation des bétons autoplaçants	89
III.5. 3. 1. L'approche de formulation	89
III.5.3.2. Application.....	90
III.6. Fabrication et cure.....	90
III.6.1. Confection des pates.....	91
III.6.2. Confection des mortiers.....	91
III.6.3. Confection des bétons	92
III.7. Caractérisation des mélanges	93
III.7.1. Des pates	93
III.7.1.1. La consistance	93
III.7.1.2. Temps de la prise.....	94
III.7.1.2. La stabilité.....	95
III.7.2. Caractérisation des mortiers	96
III.7.2.1. Résistance à la compression	96
III.7.2.2. Résistance à la traction par flexion	97
III.7.3. Caractérisation des bétons ordinaires et superplastifiés.....	98
III.7.3.1. A l'état frais	98
III.7.3.2. A l'état durci	99
III.8 Caractérisation des BAP	100
III.8.1. A l'état frais	100
III.8.1.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams	101
III.8.1.2. Essai d'écoulement à la boîte en L ou L - Box.....	102
III.8.1.3. Essai de stabilité au tamis	103
III.8.2. A l'état durci	104
III.8.2.1 La résistance à la compression.....	104
III.8.2.2. La traction par flexion	105
III.9. Composition des mélanges	105
III.9.1 Sous plan 1	106
III.9.2 Sous plan 2	108
III.10. Conclusion	109
CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS	110
IV.1.Introduction	110
IV.2. Influence de l'incorporation combinée des fillers calcaire et/ou pouzzolane naturelle.110	
laitier granulé sur les propriétés des bétons.....	110
IV.2.1. Caractérisation des liant au fillers calcaire seul	110

IV.2.1.1. Étude sur pates	110
IV.2.1.2. Résistance à la compression	112
IV.2.1.3. Résistance à la flexion	115
IV.2.1.4. Bilan	116
IV.2.2. Caractérisation des liant ternaires et quaternaires	116
IV.2.2.1. Études sur pates	117
IV.2.2.2. Étude sur mortier normalisé	119
IV.2.3. Caractérisation des bétons ordinaires et superplastifiés	122
IV.2.3.1. Propriétés des bétons à l'état frais	122
IV.2.3.2. Propriétés à l'état durci	131
IV.3. Influence de l'incorporation combinée des fillers calcaire ou poussiere du four CKD, poudre de verre sur les propriétés des bétons autoplaçants	138
IV.3.1. Caractérisation des BAP à l'état frais	138
IV.3.1.1. Étalement au cône d'Abrams (Slump flow)	138
IV.3.1.2. Le remplissage (L –box)	140
IV.3.1.3. Stabilité au tamis	141
IV.3.2. Caractérisation des BAP à l'état durci	142
IV.3.2.1. Resistance à la compression	144
IV.3.2.2. Resistance à la traction par flexion	147
IV.4. Conclusion	148
CONCLUSIONS GENERALES	151
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	155
RÉFÉRENCES NORMATIVES	166
ANNEXES	

Liste des figures

Figure I.1 : Évolution des températures à l'intérieur du four et formation des minéraux.....	5
Figure I.2 : Section transversale d'un grain de ciment	6
Figure I.3 : Cristal de portlandite.....	8
Figure I.4 : Matrice cimentaire (MEB)	10
Figure I.5 : Déflocculation des grains de ciment par l'adjuvant organique.....	21
Figure I.6 : Dispersion des grains de ciment par la répulsion électrostatique.....	21
Figure I.7 : Dispersion des grains de ciment par l'encombrement stérique.....	22
Figure I.8 : Constituants et proportions des constituants d'un béton ordinaire.....	24
Figure I.9 : Compositions du béton autoplaçant et du béton conventionnel.....	31
Figure II.1 : Illustration de l'effet filler	40
Figure II.2 : Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage de pouzzolane et de laitier.....	59
Figure II.3 : Résistance du mortier à la flexion (dan/cm ²) en fonction du temps et du pourcentage de pouzzolane et de laitier.....	59
Figure II.4 : Evolution de la résistance à la compression pour différentes combinaisons CPA / PZN / FC.....	60
Figure II.5 : La résistance en compression du mortier en fonction de la teneur en verre	61
Figure II.6 : Influence du dosage en addition sur la résistance en compression à différents âges	62
Figure III.1 : Courbe granulométrique du sable normalisé	80
Figure III.2 : Courbe granulométrique du sable et gravier.....	81
Figure III.3 : Détermination du temps de début de prise	94
Figure III.4 : Détermination du temps de fin de prise.....	95
Figure III.5 : Détermination de l'expansion.....	95
Figure III.6 : Schéma du dispositif de charge en flexion pour les éprouvettes de bétons.....	97
Figure III.7 : Essai d'étalement au cône.....	102
Figure III.8 : Essai d'écoulement à la boîte en l.....	103
Figure III.9 : Essai de stabilité au tamis	104
Figure IV.1 : Évolution de la résistance à la compression des ciments durcis en fonction du pourcentage de filler calcaire.....	113
Figure IV.2 : Évolution des résistances en compression des ciments en fonction de l'âge.	115
Figure IV.3: Évolution de la résistance à la flexion des ciments durcis en fonction du pourcentage du filler calcaire.	116.

Figure IV.4 : Évolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction des taux d'additions.	119
Figure IV.5 : Évolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de l'âge.....	121
Figure IV.6 : Évolution de la masse volumique des bétons courants en fonction du taux de fines.	122
Figure IV.7 : Évolution de la masse volumique des bétons à superplastifiant en fonction du taux de fines.....	124
Figure IV.8 : Évolution de la masse volumique du béton témoin en fonction du taux d'addition et de l'adjuvant.....	124
Figure IV.9 : Variation de l'ouvrabilité pour les bétons courants en fonction de taux d'additions.	125
Figure IV.10 : Variation de l'ouvrabilité pour les betons à superplastifiant en fonction de taux des fines.....	127
Figure IV.11 : Variation de l'ouvrabilité du beton temoin T en fonction du taux de superplastifiant et de taux d'addition.....	128
Figure IV.12 : Variation de l'air occlus des bétons courants en fonction de taux de fines	129
Figure IV.13 : Variation de l'air occlus des betons à superplastifiant en fonction de taux de fines.	130
Figure IV.14 : Variation de l'air occlus du béton temoin par rapport au bétons avec additions et superplastifiant	130
Figure IV.15 : Résistance a la compression des bétons courants.....	131
Figure IV.16 : Variation de la résistance des bétons courants en fonction de l'âge	134
Figure IV.17 : Résistance a la compression des betons à superplastifiant	134
Figure IV.18 : Variation de la résistance en compression en fonction de l'age des bétons superplastifiés.....	136
Figure IV.19 : Apport des additions et du superplastifiant au béton témoin.....	137
Figure IV.20: Influence du dosage en addition combinée sur l'étalement des BAP.	139
Figure IV.21: Influence du dosage des additions combinées sur l'écoulement (L – BOX).....	140
Figure IV.22: Influence du dosage en addition sur la stabilité au tamis.....	141
Figure IV.23 : Effet de l'addition combinée des FC+ CKD sur la résistance en compression	142
Figure IV.24 : Effet de l'addition combinée des FC+ CKD sur la résistance en compression en fonction de l'âge.....	144
Figure IV.25 : Effet de la poudre de verre sur la résistance en compression	145
Figure IV.26 : Effet de la poudre de verre sur la résistance en compression en fonction de l'âge..	146
Figure IV.27 : Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de FC et CKD	147
Figure IV.28 : Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de FC et PV.	148

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principaux minéraux du ciment portland et leurs caractéristiques.....	6
Tableau I.2 : Critères sur les propriétés physiques et chimiques.....	12
Tableau I.3 : Echelle de composition chimique des laitiers de haut fourneau	14
Tableau I.4 Composition chimique type du CKD	19
Tableau I.5 : Spécification des sables à béton selon la norme NFP 18-540	26
Tableau I.6: Spécifications des gravillons à béton selon la norme NFP 18-540.....	27
Tableau I.7: Types de béton en fonction de leur masse volumique.....	28
Tableau I.8: Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams	29
Tableau I.9: Classes de résistance à la compression.....	30
Tableau II.1 : les résultats des tests de la fluidité pour la surface et tailles de différentes particules de laitier	50
Tableau II.2 : proportions du mélange et l'ouvrabilité	52
Tableau III.1 : Composition chimique du ciment portland	71
Tableau III.2 : Composition minéralogique du ciment portland	71
Tableau III.3 : Caractéristiques physiques du ciment portland.....	72
Tableau III.4 : Résistances mécaniques du ciment	72
Tableau III.5 : Composition chimique du filler calcaire	73
Tableau III.6 : Caractéristiques physiques du filler calcaire	73
Tableau III.7 : Composition chimique du laitier granule de haut fourneau	74
Tableau III.8 : Module de basicité (mb) et module d'activité (ma).....	75
Tableau III.9 : Caractéristiques physiques du laitier granule de haut fourneau.....	75
Tableau III.10 : Composition chimique de la pouzzolane naturelle	76
Tableau III.11 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle	76
Tableau III.12 : Composition chimique de la poudre de verre.....	77
Tableau III.13: Caractéristiques physiques de la poudre de verre	77
Tableau III.14 : Composition chimique de la poussière de four	78
Tableau III.15 : Caractéristiques physiques de la poussière de four.....	78
Tableau III.16 Analyse chimique de l'eau	92
Tableau III.17 : Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant.....	79
Tableau III.18 : Caractéristiques physiques du sable normalisé	80
Tableau III.19 : Caractéristiques physiques des granulats utilisés	82
Tableau III.20 : Analyse chimique des granulats	84
Tableau III.21 : Les paramètres et les essais effectués.....	86
Tableau III.22 : Proportion des constituants des mélanges aux filler calcaire, pouzzolane naturelle et laitier granule.....	87
Tableau III.23 : Proportion des constituants des mélanges aux filler calcaire, poudre de verre et poussière de four de cimenterie	88

Tableau III.24 : Caracteristiques du beton temoin.....	89
Tableau III.25 : Classes d'etalemt des BAP	102
Tableau III.26 : Critere de stabilite	104
Tableau III.27 : Compositions des pates de ciment	106
Tableau III.28 : Compositions des echantillons de mortier pour la resistance mecanique	106
Tableau III.29 : Compositions des pates a additions combinees	106
Tableau III.30 : Compositions des mortiers a additions combinees	107
Tableau III.31 Compositions des betons ordinaires.....	107
Tableau III.32 : Compositions des betons supeplastifies	108
Tableau III.33 : Compositions des BAP	108
Tableau VI.1 : Propriétés physiques des pates de ciment en fonction du taux de filler calcaire	111
Tableau V.2 : Proprietes physiques des pates de ciment en fonction des combinaisons d'additions	117

Liste des photos

Photo III.1 : Le filler calcaire	72
Photo III.2 : Le laitier de hauts fourneaux.....	74
Photo III.3 : La pouzzolane naturelle.....	75
Photo III.4 : La poudre de verre.....	77
Photo III.5 : La poussiere de four de ciment	78
Photo III.6 :Le superplastifiant utilise.....	79
Photo III.7 : Malaxeur automatique	91
Photo III.8 : Mortiers confectionnes	92
Photo III.9 : Le malaxeur utilisé	93
Photo III.10 : Dispositif de charge en compression pour les eprouvettes de mortiers	96
Photo III.11: Mesure de l'affaissement au cone d'abrams.	98
Photo III.12: Essai de compression.....	100
Photo III.13 : Essai de traction par flexion trois points.....	105

Liste des abréviations

FC : filler calcaire

LG: Laitier granulé

PN: Pouzzolane naturelle

PV : Poudre de verre

CKD : Poussière de four de ciment

BAP : Béton autoplaçant

f_c : Résistance moyenne visée à 28 jours

f_{c28} : Résistance caractéristique demandée à 28 jours

f_c : Résistance moyenne à viser

G : Coefficient granulaire

f_{mc} : Classe vraie du ciment à 28 jours en bars

C : Dosage en ciment

E : Dosage en eau totale sur matériaux secs

V: volume absolu de l'ensemble des granulats

σ_c : la résistance en compression

S : la section transversale de l'éprouvette

F : la charge de rupture en compression

Rt : Résistance à la traction.

P : Charge de rupture en flexion

L : Distance entre appuis inférieurs

a : Coté de l'éprouvette

Mv : la masse volumique du béton frais

Introduction générale

Introduction générale

Les développements récents dans le domaine du béton montrent que l'incorporation conjuguée d'adjuvants fluidifiants et d'additions minérales fines et ultrafines conduit, généralement, à l'augmentation des performances du matériau ou à lui conférer des propriétés particulières. Les additions minérales les plus utilisées dans la fabrication de ces bétons proviennent de sources naturelles (pouzzolane, calcaire...) ou de sous-produits industriels (laitier de haut fourneau). L'exploitation continue et sans cesse de ces matériaux entraîne l'épuisement de ressources disponibles. La valorisation de nouveaux déchets disponibles et à faibles coûts est une approche prometteuse.

Notre présente étude porte sur l'étude de l'effet de l'interaction ciment-polyadditions ou bien additions combinés-adjuvant sur les propriétés des bétons. Plusieurs auteurs se sont intéressés à déceler le comportement des additions minérales normalisé dans les matériaux à matrice cimentaire en présence d'un adjuvant. Les résultats des études publiées dans le domaine montrent un gain de résistance et de durabilité avec l'amélioration des propriétés à l'état frais.

Dans notre cas, on tente de valoriser le filler calcaire issu de concassage des granulats pour béton. L'idée vient du fait qu'au cours de ces dernières années le secteur de la construction en Algérie connaît un essor considérable en matière de réalisation des bâtiments, des infrastructures et des ouvrages d'art. Cette activité en évolution permanente exige de gros approvisionnements en matériaux. Les granulats les plus couramment utilisés pour la confection des bétons entrant dans ces ouvrages sont des granulats de concassage. La fragmentation des roches s'accompagne systématiquement d'une production de fines appelées fillers. Ils sont généralement calcaires et parfois pollués par les argiles. Certaines stations de concassage se sont équipées d'installation permettant la récupération de fillers afin de les vendre séparément. Par contre d'autres carrières ne disposent pas de ces équipements. L'excès de fines non exploité et stocké sur les lieux de concassage s'accumule au fil du temps formant ainsi des couches de poussière qui, de par leur finesse sont aisément transportées par le courant d'air et entraîne une pollution physique et esthétique de l'environnement. Leur incorporation dans un matériau de construction tel que le béton revêt un intérêt particulier tant sur le plan technique, économique ainsi que sur le plan environnemental.

Sur le plan technique, notre souci majeur n'est pas d'élaborer des bétons à base de filler

calcaire plus performants que les bétons ordinaires mais plutôt d'obtenir des bétons de résistances équivalentes. Quant au volet économique, comme toutes les additions minérales, le filler calcaire peut être substitué au ciment CPA pour constituer un liant pour le béton et par conséquent assurer une économie dans la consommation du ciment dont le prix ne cesse d'augmenter et dont le processus de fabrication porte préjudice à la qualité de l'air en raison des rejets de gaz à effet de serre. Enfin, sur le plan environnemental, il s'agit de procéder à la diminution des quantités de poussière de calcaire stockées au niveau des stations de concassage des granulats en les évacuant en vue d'une exploitation pour la fabrication du béton. Cette opération permettra la réduction de la pollution et l'exploitation rationnelle des ressources. Ce qui est conforme aux impératifs de développement durable.

Dans le cadre de ce travail, nous tenterons de montrer la possibilité d'incorporer le filler calcaire récupéré, seul ou conjugué à d'autres additions dans la fabrication des bétons. Les questions suivantes sont posées :

- Est-ce possible d'utiliser le filler calcaire comme ajout cimentaire dans le béton en vue d'améliorer ses propriétés physiques et mécaniques?
- Les bétons superplastifiés avec filler calcaire conjugué à d'autres additions présentent-ils un bon comportement à l'état frais et durci ?
- Comment se comportent les bétons autoplaçants à base de combinaisons d'additions choisies ?

Pour atteindre l'objectif visé sus cité, deux sous-plans ont été construits :

Le filler de calcaire a été introduit seul et combiné au laitier granulé de haut fourneau ou/et pouzzolane naturelle en substitution massique dans la composition des pâtes de ciments, puis dans des mortiers normalisés et enfin dans des bétons courants et des bétons superplastifiés. On a étudié en premier lieu l'impact des additions pour différents taux de substitution sur les propriétés des liants confectionnés, notamment l'influence du type et du taux d'ajout sur la consistance, le temps de prise, la stabilité, les résistances mécaniques (compression et traction) pour différentes échéances (2,7, 28jours), afin de mettre en évidence les causes à l'origine des modifications induites. Pour les bétons, on s'est intéressé à mesurer et analyser cet effet sur la masse volumique, l'affaissement, l'air occlus et la

résistance mécaniques en compression pour les deux échéances 7, et 28jours.

Par la suite, il est apparu opportun de concevoir aussi des bétons autoplaçants à partir des deux combinaisons filler calcaire - poudre de verre et filler calcaire –poussière du four de la cimenterie. L’approche adoptée ici est différente. Elle consiste en une substitution volumique des pourcentages de filler calcaire par les deux additions suscitées et à étudier le comportement à l’état frais et les résistances mécaniques des bétons autoplaçants élaborés.

Ce travail de thèse décrit la démarche scientifique adoptée, les résultats obtenus et l’analyse qui en a été faite. Il s’organise en quatre chapitres.

Le premier chapitre tente de faire un état de l’art sur les caractéristiques des matériaux composant un béton (le ciment, les additions minérales, les adjuvants, l’eau, les granulats) et sur les qualités essentielles à l’état frais et à l’état durci d’un béton ordinaire et d’un béton autoplaçant ainsi que les paramètres influençant ces qualités.

Le deuxième chapitre décrira les actions des additions minérales et des adjuvants dans les matériaux cimentaires afin d’éclairer en particulier la façon dont elles contribuent à l’activité liante du ciment. L’accent est mis particulièrement sur des principaux travaux algériens concernant le sujet.

Le troisième chapitre est dédié à l’étude expérimentale. Il comporte un rappel de l’objet de l’étude et le détail du plan expérimental associé. La provenance et la préparation des matériaux sont détaillées et les caractérisations des différentes propriétés physiques, mécaniques et chimiques des matériaux sont également présentées. Aussi, nous précisons les différentes méthodes d’essais utilisés ainsi que leurs modes opératoires et les références de leurs normes correspondantes. Enfin, nous listons les différents mélanges étudiés.

Le quatrième chapitre présente des résultats expérimentaux obtenus. Les comportements des différents mélanges seront également décrits en détail. On rend compte de l’effet du type de ciment sur les performances des liants et des bétons élaborés.

Enfin, nous clôturons ce travail par des conclusions générales, et nous y rappelons les principaux résultats obtenus, en ouvrant la perspective de nouvelles études qui nous semblent possibles pour le développement future.

Chapitre I
Notions sur les matériaux cimentaires
& les bétons

Chapitre I : Notions sur les matériaux cimentaires & les bétons

I.1. Introduction

La première partie de cette thèse vise à présenter un état de connaissance sur les matériaux cimentaires utilisés ainsi qu'à rappeler un certain nombre de notions en rapport avec les propriétés des bétons ordinaires et des bétons autoplaçants.

Ce chapitre se divise en quatre sections. La première section porte sur les constituants du ciment, leurs caractéristiques chimiques ainsi que leurs évolutions au cours de l'hydratation. Dans la deuxième section, on fait une mise au point sur les définitions des additions, les concepts d'indice et de coefficient d'activité. Ce chapitre traitera aussi, dans la troisième section, l'effet des superplastifiants sur les propriétés des bétons. Finalement, on présente les bétons ordinaires et leurs constituants, les bétons autoplaçants et leurs propriétés à l'état frais et durci ainsi que leurs conditions de réalisation.

I.2. Le ciment portland

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 hydraté.

I.2.1. Définition

Le ciment Portland est le ciment le plus couramment employé dans la fabrication des bétons. C'est par définition un liant hydraulique, capable de faire prise (durcir) au contact de l'eau. Il se présente sous forme de poudre volatile de très grandes finesse de l'ordre de 20 μ m (anhydres), et qui mélangé à de l'eau produit un certain nombre de réactions chimiques d'où la formation d'hydrates qui se rigidifient au fil du temps lui conférant des propriétés mécaniques intéressantes vis-à-vis d'applications pour le génie civil.

I.2.2. Composition chimique du ciment Portland

Il est constitué de clinker et des additions minérales de types : Laitier de hauts fourneaux ; Cendres volantes ; Fillers calcaires, Pouzzolanes naturelles, Fumée de silice, Schistes calcinés dont le but est de lui conférer de nouvelles propriétés, capables de résoudre les différents problèmes qui peuvent se poser lors de la réalisation des ouvrages (performances mécaniques

améliorées, environnements agressifs...).

Le clinker ayant un caractère durcissant très rapide, afin d'en réduire l'effet, il lui est ajouté du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ à hauteur de 3 à 5%.

I.2.2.1. Les phases du clinker

Les matières premières entrant dans la fabrication du clinker sont le calcaire et l'argile dans les proportions respectivement proche de 80% et 20%. Le calcaire apporte le calcium, l'argile apporte la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3 et l'oxyde ferrique Fe_2O_3 nécessaire pour le processus de fabrication. Après extraction et concassage, ces deux roches sont mélangées, décarbonatées et transformées lors d'une cuisson dans un four où la température atteint 1450°C . Le produit formé, le clinker, est trempé à l'air. Les granules de clinker sont ensuite broyés finement.

Les différentes phases de la réaction de transformation de la matière première en clinker sont présentées à la figure I.1.

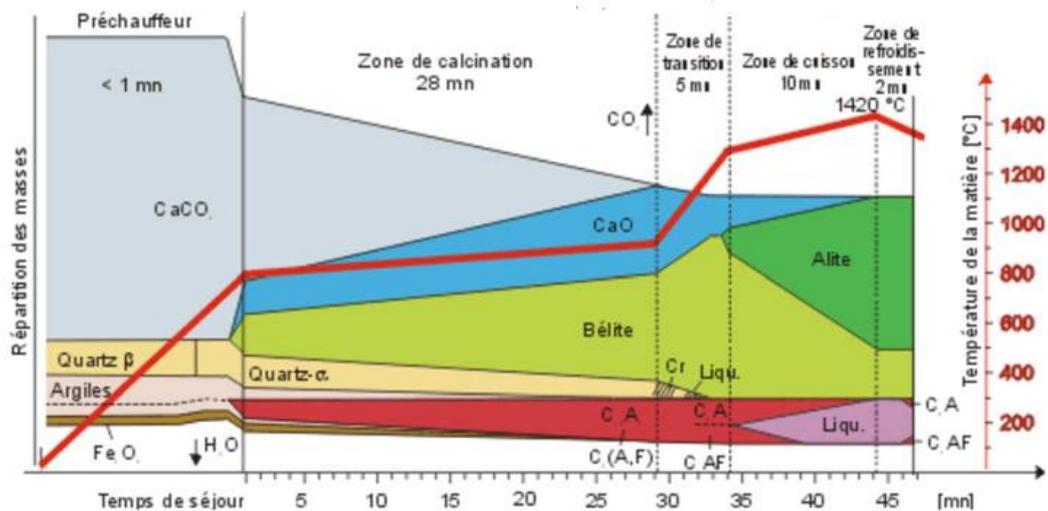


Figure I.1:Évolution des températures à l'intérieur du four et formation des minéraux [1].

L'étude minéralogique du clinker montre qu'il est constitué de quatre phases cristallines principales :

- Silicate tricalcique (Alite) ou C_3S en notation cimentaire, et dont la formule est $3\text{CaO},\text{SiO}_2$
- Silicate bicalcique (Bélite) ou C_2S dont la formule est $2\text{CaO},\text{SiO}_2$;
- Aluminate tricalcique (Célite) C_3A , de formule $3\text{CaO},\text{Al}_2\text{O}_3$;
- Alumino-ferrite tétracalcique C_4AF , de formule $4\text{CaO},\text{Al}_2\text{O}_3,\text{Fe}_2\text{O}_3$.

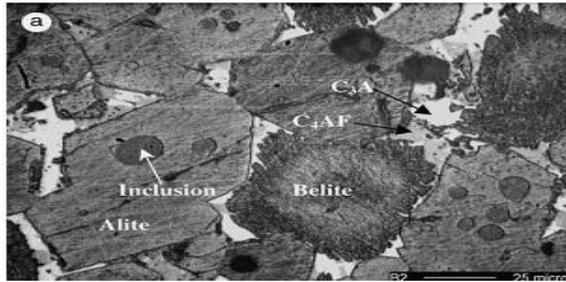


Figure I.2 : Section transversale d'un grain de ciment [2].

Les caractéristiques des principaux composants du ciment Portland sont présentées dans le tableau I.1.

Tableau I.1 : Principaux minéraux du ciment Portland et leurs caractéristiques [3].

Formule abrégée	C ₃ S	β-C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Composition approximative	Ca ₃ SiO ₅	Ca ₂ SiO ₄	Ca ₃ Al ₂ O ₆	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀
Nom	Alite	Bélite	Célite	Ferrite
Principales impuretés	2,0 % pour MgO	MgO, Al ₂ O ₃ et un peu de K ₂ O	SiO ₂ , Alcalis... MgO,	SiO ₂ , MgO...
	1,0 % pour Al ₂ O ₃			
	1,1 % pour Fe ₂ O ₃			
Forme cristalline commune	Monoclinique	Monoclinique	Cubique Orthorhombique	Orthorhombique
Proportion des composés présents (%)	35 à 65	10 à 40	0 à 15	5 à 15
Moyenne dans le ciment normal	50	25	8	8
Réactivité avec l'eau	Rapide	Lent	Rapide	Moyenne
Contribution à la résistance :				
• Jeune âge	Bonne	Faible	Bonne	Bonne
• Long terme	Bonne	Excellente	Moyenne	Moyenne
Chaleur d'hydratation typique (Kj/Kg)	Moyenne 120	Basse 60	Elevée 320	Moyenne 100

* C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃.

La Contribution des phases cristallines à la résistance se résume en :

- Le C3S est essentiel pour le développement de la résistance mécanique au jeune âge.
- La bélite joue un rôle dans le développement de la résistance mécanique à long terme. Elle atteint une résistance comparable à celle de l'alite mais beaucoup plus lentement.
- La phase aluminat présente la plus forte réactivité des quatre phases du clinker et joue, de ce fait, un rôle essentiel dans la plasticité des systèmes cimentaires à jeune âge plus particulièrement.
- La phase ferrite présente une réactivité équivalente à celle de la phase aluminat. Sa réactivité est d'autant plus faible que la teneur en Fe_2O_3 est grande.

I.2.2.2. Les sulfates de calcium

Les sulfates de calcium sont ajoutés au clinker dans le but de contrôler l'intensité des réactions d'hydratation initiales. Le terme de gypse est souvent utilisé comme un terme qui englobe les différents sulfates de calcium ajoutés au ciment. Il existe deux formes naturelles stables de sulfates de calcium : le sulfate de calcium anhydre, l'anhydrite, de formule chimique CaSO_4 , et le sulfate de calcium déshydraté, le gypse, de formule chimique $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et une forme de synthèse, l'hémihydrate, $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$.

I.2.2.3. Les éléments mineurs

Aucune des phases principales du clinker ne se trouve à l'état pur. La présence d'impuretés dans le clinker (MgO , sulfates alcalins, CaO_2) joue un rôle important sur les propriétés hydrauliques du ciment. Ces composés mineurs proviennent généralement des matières premières, du combustible et parfois des réfractaires ou des équipements.

I.2.3. Hydratation du ciment Portland

« Hydratation » est le terme utilisé pour décrire de la manière la plus générale, l'ensemble des réactions chimiques qui interviennent dès que l'on mélange le ciment avec de l'eau, et qui permettent de transformer les anhydres en hydrates.

L'hydratation du ciment provoque le durcissement de la pâte de ciment, suspension fluide ou plastique, laquelle va se transformer en un matériau solide et résistant. On peut alors parler d'une « pierre de ciment », véritable roche artificielle mais qui évolue dans le temps et suivant les conditions de température et d'humidité environnantes.

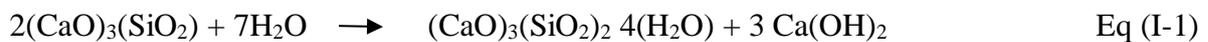
Bien qu'étudiés depuis plusieurs décennies, les mécanismes réactionnels qui se produisent dans les ciments sont particulièrement complexes et ne sont à l'heure actuelle pas encore

complètement connus [4]. Cette complexité résulte du nombre important de composés présents (anhydres et hydratés) et des divers mécanismes réactionnels entrant en jeu durant le processus de durcissement (dissolution des anhydres, nucléation et croissance des hydrates, diffusion des ions dans les pores ou encore adsorption de composés).

L'hydratation d'un ciment Portland peut se résumer, dans une approche simplifiée, à l'hydratation des quatre constituants de base (C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF).

I.2.3.1. Hydratation des silicates

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (Ca_3SiO_5) et les silicates bicalciques (Ca_2SiO_4) se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($Ca(OH)_2$) (équations (I-1) et (I-2)) :



Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation.

Les C-S-H sont des composés non cristallins. Ils ont les caractéristiques d'un gel et possèdent une composition variable, leur formule générale est la suivante : $(CaO)_x(SiO_4)_y(H_2O)_z$ avec $0.6 < x/y < 2$ et $1 < z < 4$. Leur composition moyenne est proche de $(CaO)1.7(SiO_4)(H_2O)_4$. L'enchevêtrement du gel C-S-H donne sa solidité au ciment : les C-S-H se développent à la surface des grains de ciment non hydratés et comblent progressivement les interstices capillaires entre les grains. Au bout de quelques heures, la couche d'hydrates qui enrobe les grains de ciment devient assez épaisse pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau vers les composants anhydres du système. L'hydratation ralentit de plus en plus, mais peut se poursuivre pendant des mois voire des années.

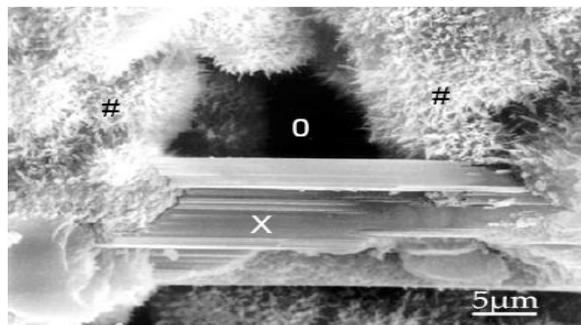


Figure I.3 : Cristal de portlandite (X) entre des C – S – H (#), d'après [5].

La cinétique d'hydratation du C_2S est beaucoup plus lente que celle du C_3S . À court terme, les silicates hydratés formés proviennent donc majoritairement du C_3S , qui a un rôle prépondérant dans les montées en résistance à court terme des bétons. L'hydratation plus lente du C_2S , après 28 jours, conduit à l'amélioration des résistances à long terme. Des essais sur de l'alite et de la bélite ont mis en évidence que les résistances à long terme sont comparables et que seule la cinétique d'hydratation est différente [6].

I.2.3.2. Hydratation des aluminates

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du gypse au clinker pour contrôler ces réactions. Les réactions avec les aluminates s'effectuent en plusieurs étapes:

- **Étape 1 : Formation d'ettringite (phase AFt)**

Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite TSA (trisulfoaluminate de calcium hydraté) : $((CaO)_6(Al_2O_3)(SO_3)_3, 32H_2O)$. Cette réaction est fortement exothermique. Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment alors une couche protectrice autour du grain.

- **Étape 2 : Transformation de l'ettringite en monosulfate de calcium hydraté**

Lorsque le gypse est épuisé, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté (appelé AFm) : $((CaO)_3(Al_2O_3)(CaSO_4), 12H_2O)$. Les réactions chimiques s'intensifient.

- **Étape 3 : Hydratation des aluminates résiduels**

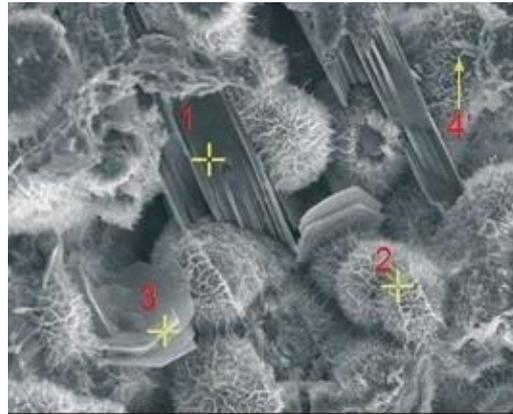
Au bout de quelques semaines, en général, l'ettringite se transforme totalement en monosulfoaluminate. Au-delà d'un mois, les réactions se poursuivent lentement avec l'aluminate (C_3A) et l'alumino-ferrite (C_4AF) pour former de l'alumino-ferrite de calcium hydraté. Même si les séquences réactionnelles sont proches du C_3A , l'alumino-ferrite tétracalcique (C_4AF) est nettement plus lent à réagir et n'apparaît de manière significative qu'une fois que le gypse est totalement épuisé [6].

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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ « Portlandite », représente 20 à 30% en masse d'une pâte de ciment hydraté.
- Les sulfo-aluminates de calcium « Ettringite » et les monosulfates constituent 5 à 15% d'une pâte de ciment hydraté.

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



1 : Portlandite, 2 : C-S-H, 3 : aluminates de Calcium hydratés, 4 : ettringite

Figure I.4 : Matrice cimentaire (MEB) [7].

I.2.4. Paramètres influençant la qualité du ciment Portland

Les paramètres de fabrication du ciment Portland ont une influence indéniable sur les caractéristiques du produit final. Ainsi, la vitesse avec laquelle les résistances du ciment hydraté vont augmenter avec le temps, le dégagement de chaleur concomitant, la résistance aux agents chimiques et plus généralement la durabilité, dépendent de: la composition chimique (les clinkers obtenus peuvent être très différents les uns des autres suivant les matières premières utilisées, le procédé de fabrication et la vitesse de refroidissement), le traitement thermique (chauffage et refroidissement) et de la finesse du clinker [8].

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation sont élevées et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuage. Pour obtenir de bonnes résistances mécaniques, il est nécessaire de mouler finement le clinker, cela fait augmenter la proportion d'hydrates dans le béton durci par

rapport aux anhydres. Pour les bétons à faible rapport E/C, cette augmentation de finesse conduit à l'augmentation de la compacité de la pâte. Par ailleurs, si la proportion de grain de ciment ultrafins devient importante, la prise risque d'être instantanée dès le gâchage et conduira à un ciment, à forte chaleur d'hydratation, générateur de contraintes d'origine thermique, et donc des fissurations dans la peau des pièces massives [9].

I.3. Les additions minérales

La substitution partielle du ciment par des additions minérales est une pratique de plus en plus courante, aussi bien sur les chantiers que dans les bétons prêts à l'emploi. Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes.

I.3.1. Définition et normalisation des additions

La norme européenne EN 206 -1 (septembre 2004), définit, les additions comme matériaux minéraux finement divisés et pouvant être ajoutés au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières.

Il existe deux types d'additions:

- les additions quasiment inertes (type I)
- et les pouzzolanes ou additions à caractère hydraulique latent (type II).
 - **Addition type I**
 - Les additions calcaires conformes à la norme NF P 18-508.
 - Les additions siliceuses conformes à la norme NF P 18-509.
 - Les fillers conforme à la norme NF P 18-501.
 - **Addition type II**
 - Les cendres volantes de houille conforme à la norme européenne EN 450-1,
 - La fumée de silice conforme à la norme européenne EN 13263-1.
 - Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau de classe B conforme à la norme NF P18 506.

Dans la suite de l'étude, nous ne traiterons que les cas des additions dont il est question dans cette étude, à savoir les additions calcaires, le laitier de haut fourneau, la pouzzolane naturelle, la poudre de verre et la poussière du four de la cimenterie.

I.3.1.1. Les additions calcaires

Un filler calcaire est une fine minérale obtenue par broyage d'une roche calcaire de manière à répondre aux critères de conformité de la norme sur les additions minérales calcaires (NF P18-508). L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement s'insère dans le squelette granulaire du ciment et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). Les critères qui les définissent dans la norme NF P18-508 représentent des propriétés physiques et chimiques (Tableau I.2).

Tableau I.2 : Critères sur les propriétés physiques et chimiques.

Catégories	A	B
Teneur CaCO ₃ total (%)	> 95	≥ 65
CaCO ₃ + MgCO ₃ (%)	> 95	≥ 90
Valeur de Bleu de méthylène (g/kg)	< 3	< 10
Surface massique Blaine (cm ² /g)	> 3000	> 2200
Passant à 63 μm (%)	> 70	> 70

Si l'addition calcaire répond aux critères de conformité de la norme NF P18-508, elle peut alors être prise en compte lors de la formulation du béton pour des dosages prescrits par la norme NF EN 206-1. Dans ce contexte une partie du filler calcaire peut être utilisée dans le calcul du liant équivalent (Eq 1-3) en respectant les restrictions imposées par la classe d'environnement (Eq. 1-4).

$$\text{Liant équivalent} = \text{Leq} = C + kA \quad \text{Eq. (I-3)}$$

Avec : C = dosage en ciment en kg/m³.

A = quantité de l'addition en kg/m³.

k = coefficient de prise en compte de l'addition à condition que l'indice d'activité de l'addition calcaire soit supérieur à 0,71.

$$\text{Et : } 0 < A / A + C < 0,25 \quad \text{Eq. (I-4)}$$

D'un point de vue de la composition minéralogique, certaines roches moins « pures » peuvent contenir d'autres composants principaux comme de la dolomie ou du quartz ainsi que des composants secondaires comme Al₂O₃, Fe₂O₃ et des alcalins à des dosages variables. De plus,

des impuretés telles que des argiles peuvent être présentes dans les inclusions de la roche en dosages généralement faibles. Ces dernières influent notamment fortement sur la demande en eau [10].

I.3.1.2. Les laitiers de hauts fourneaux

Le laitier de hauts fourneaux est un sous-produit de fabrication de la fonte des usines sidérurgiques. Il est formé de la gangue du minerai de fer, des fondants ajoutés, des impuretés du coke. Ce sont des silico-aluminates de calcium et de magnésium.

Le laitier est recueilli à la partie inférieure du haut fourneau à une température comprise entre 1425 et 1550°C.

Les composants chimiques principaux du laitier sont CaO, SiO₂, Al₂O₃ et MgO. Pour un minerai donné, on doit avoir de faibles variations de compositions chimiques, de façon que l'opération de réduction dans le haut fourneau ne soit pas perturbée ou qu'elle ne consomme pas trop d'énergie thermique.

➤ Le laitier cristallisé

Le laitier de haut fourneau est cristallisé lorsqu'il est dirigé par une rigole vers des fosses où il refroidit et se cristallise lentement à l'air sous forme de roche dure. Après le début de la solidification, ce laitier est arrosé afin d'en abaisser la température puis fragmenté, concassé et criblé.

➤ Le laitier vitrifié

Le laitier de haut fourneau est dit vitrifié, ou granulé, s'il est dirigé vers un dispositif dans lequel il subit une trempe (arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression). L'énergie calorifique contenue dans le laitier en fusion provoque son explosion et forme instantanément de fines particules d'un produit vitreux désordonné. Il possède ainsi une énergie interne plus élevée qu'à l'état cristallin, ce qui le rend plus réactif chimiquement [11]. Lors de son hydratation, le laitier évoluera sous une forme cristalline stable pouvant être mis à profit pour les formulations de ciments ou de béton. On distingue deux types de laitiers vitrifiés :

- le laitier vitrifié granulé, pour lequel le refroidissement se fait en bassin ou par jet d'eau sous pression. Le principe de la granulation est d'extraire le plus possible de chaleur d'une quantité de laitier fondu, en un minimum de temps.

- le laitier vitrifié bouleté soumis à deux types d'actions, un jet d'eau et une action mécanique. Le laitier liquide se déverse sur un tambour tournant cannelé qui comporte des trous en périphérie, alimentés en eau sous pression. Les particules de laitiers sont alors projetées à plusieurs mètres du tambour, ce qui permet une trempe à l'air pendant la durée du trajet des particules.

Le laitier ainsi vitrifié, présente une structure vitreuse, irrégulière et riche en énergie. La réactivité et les propriétés hydrauliques du laitier vitrifié dépendent des aspects suivants :

- l'hydraulicité du laitier ou sa réactivité hydraulique, est liée à son taux de vitrification, c'est-à-dire à l'importance de la partie vitreuse par rapport à la partie cristallisée. Ce taux est d'autant plus grand que le laitier est actif.
- le laitier vitreux possède une structure riche en énergie du fait de la trempe, le liquide suspendu concerne une énergie de cristallisation non dissipé qui va lui permettre d'être hydraulique.

➤ La chimie du laitier de haut fourneau

Chimiquement, le laitier est essentiellement composé de quatre oxydes CaO, SiO₂, Al₂O₃ et MgO. La composition chimique des laitiers de haut fourneau est proche de celle du clinker, en moyenne elle est la suivante :

Tableau I.3 : Échelle de composition chimique des laitiers de hauts fourneaux [12].

Constituant	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Fe	S
Teneur en %	35- 48	32-41	9-18	1-9	0,4-0,7	0,2-3	0,4-1,5

Des traces de TiO₂, Na₂O, K₂O, SO₃ sont également détectées dans ce type de laitier.

Les laitiers comme les ciments portland sont des produits à très forte hydraulicité ; mais si pour le ciment portland l'hydraulicité est déclenchée par simple addition d'eau, pour le laitier, elle doit être déclenchée et stimulée par un activant basique. Dans les ciments au laitier, le clinker est l'activant principal du laitier. Cependant les premiers hydrates produits seront ceux du clinker ; C-S-H et Ca(OH)₂ qui recouvrent uniformément les grains du laitier et du clinker. Par

la suite, l'excès de chaux active l'hydratation du laitier avec une texture C-S-H semblable à celle des ciments ; il en résulte alors des silicates de calcium hydratés et des aluminates tétracalciques hydratés [13].

➤ Réactivité hydraulique du laitier

Il faut tenir compte de plusieurs paramètres pour pouvoir évaluer la réactivité du laitier de haut fourneau. La composition chimique a un rôle important sur la réactivité du laitier. La réactivité augmente avec la teneur en chaux et en magnésie (jusqu'à 15%), mais diminue avec la teneur en silice et en oxyde de manganèse. Les calculs d'indices de basicité permettent d'évaluer le caractère hydraulique des laitiers. Ils correspondent à la somme des constituants basiques du laitier sur la somme de ses constituants acides. Pour une bonne activité hydraulique, l'indice de basicité CaO/SiO_2 doit être proche de 1,3 comme [11].

Les indices chimiques ou encore d'activité les plus répandus sont :

L'indice de basicité « Ib » 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, parmi lesquelles nous citons:

$\text{Ib}_1 = \text{CaO/SiO}_2$, $\text{Ib}_2 = \text{CaO} + \text{MgO/SiO}_2$, $\text{Ib}_3 = \text{CaO} + \text{MgO/SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$.

L'indice de basicité ($\text{Ib} = \text{CaO/SiO}_2$) est le plus couramment utilisé.

Suivant cet indice les laitiers peuvent être classés en trois catégories :

$\text{Ib} = 1,3$ à $1,4$: les laitiers de basicité élevée

$\text{Ib} = 1,1$ à $1,2$: les laitiers de basicité modérée

$\text{Ib} < 1$: les laitiers acides.

L'indice d'activité

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

$$I_a = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \quad \text{Eq. (I- 5)}$$

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.

I.3.1.3. Les pouzzolanes naturelles

Ce sont des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer présentant, soit naturellement (lorsqu'elles sont d'origine volcanique), soit après activation thermique des propriétés pouzzolaniques. Les pouzzolanes doivent leur nom aux cendres volcaniques de la région de Pouzzoles, en Italie, qui étaient utilisées par les Romains pour la confection de leur liant hydraulique. Les pouzzolanes n'ont pas de propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence de la chaux libérée par le clinker au cours de son hydratation, elles forment elles aussi des hydrates stables, semblables à ceux qui sont formés à la suite de l'hydratation du clinker.

➤ Définition (ASTM 618-94)

Une définition plus explicite est donnée par la norme d'ASTM 618-94 qui décrit une pouzzolane comme un matériau siliceux ou silico-alumineux qui, intrinsèquement, possède peu ou pas de valeur hydraulique, mais qui, finement broyé en présence d'humidité et à des températures ordinaires, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés possédant des propriétés hydrauliques.

➤ Propriétés physiques

D'aspect rugueux et caverneux de porosité fermée, la pouzzolane a une capillarité très faible. Sa densité apparente varie de 0.65 à 0.95. Très résistante au feu et au choc, elle fond vers 1140°C.

➤ Propriétés chimiques

✓ **la composition** : trois constituants principaux : silice, alumine et de l'oxyde ferrique parfois de la chaux mais pas suffisamment pour donner des sels insolubles de chaux, de silice, d'alumine dont la formation provoquerait la prise. Elle n'a pas de propriétés hydrauliques, la pouzzolane est incapable de faire prise isolément.

✓ **la propriété pouzzolanique** : la pouzzolane communique à la chaux grasse les propriétés hydrauliques, mais suivant les variations de sa composition chimique elle est plus au moins active. L'activité pouzzolanique est caractérisée par la quantité de chaux absorbée par 1 g de pouzzolane en 30 jours. Elle se produit par l'effet de la réaction de la chaux sur les produits formés par l'attaque alcaline des silicates acides.

L'activité pouzzolanique dépend principalement de la structure amorphe ou vitreuse de l'ajout.

D'un autre côté, les composants cristallins de l'ajout exercent une petite influence sur ses propriétés. Pour les ciments ayant une quantité de C_3A élevée, l'incorporation de l'addition accélère la réaction d'hydratation et augmente le taux de chaleur. Pour les ciments ayant une faible quantité en C_3A , le comportement dépend de la nature de l'addition [14].

I.3.2. Les additions non normalisées

Bien que on assiste à une évolution spectaculaire des textes normatifs notamment européens, il est important de souligner que plusieurs produits minéraux qui ne sont pas pris en compte par la normalisation spécifique sur les additions ont fait objet d'études plus ou moins approfondies quant à leur potentiel d'utilisation comme additions dans le béton sans vouloir dresser une liste exhaustive nous signalons ici quelques exemples caractéristiques : le méta kaolin, les oxydes de titane et les oxydes de zirconium.

I.4. Les polyadditions minérales

Le terme polyaddition se compose de deux éléments : poly et addition. Poly : est un préfixe qui vient du grec (polloí) qui signifie « plusieurs » et « beaucoup ». Addition : signifie adjuvant minéral normalisé ou non normalisé.

Dans le domaine de la construction le terme polyaddition désigne la combinaison de plusieurs additions minérales.

Ce terme a été utilisé dans quelques travaux de recherche tels que: « comportement au jeune âge de bétons formulés avec des polyadditions minérales » élaborés au niveau de l'université libre de Bruxelles en Belgique ; « Optimisation of concrete mix design with high content of mineral additions: effect on microstructure, hydration and shrinkage » établi par [15].

I.5. Les déchets

On entend par déchet, tout résidu d'une production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné. Ces matériaux sont souvent à l'origine de la détérioration de notre environnement et de multiples risques pour la santé humaine.

La gestion des déchets et sous-produits industriels est aujourd'hui un enjeu technique, économique et environnemental pour la société dans son ensemble et les entreprises en particulier. Celles-ci doivent notamment, par exemple à travers une analyse du cycle de vie de leurs produits ou services, intégrer dans leur procédé la gestion des résidus et sous-produits.

Le domaine le génie civil est appelé à jouer un rôle important dans la protection de la nature et

l'environnement par l'utilisation des déchets solides dans la fabrication des matériaux de construction (liants et bétons) et dans la réalisation des structures (remblais et les assises de chaussées, etc....) afin de limiter l'exploitation excessive des ressources naturelles et de diminuer la pollution atmosphérique (en remplacement du ciment portland par les ajouts). On peut citer à titre d'exemple: la poudre de verre, la poudre de marbre, la poussière du four de la cimenterie ...etc.

I.5.1. La poudre de verre

Le verre est un matériau à plusieurs vies et peut être recyclé plusieurs fois. C'est un produit solide, homogène non cristallin (amorphe) obtenu par trempe d'un liquide surfondu [16]. Ses principales caractéristiques résident dans sa composition chimique, sa finesse, et sa phase amorphe.

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contient des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est finement broyé. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland dans les bétons.

Selon la norme ASTM C618, un matériau est considéré comme pouzzolanique si sa composition chimique vérifiée $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70\%$ 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).

$$i = 100 \times R_a / R_t \quad \text{Eq. (I- 6)}$$

L'indice d'activité est un paramètre qui décrit quantitativement le taux de réaction entre un matériau pouzzolanique et la portlandite $Ca(OH)_2$ en présence d'eau pour former du gel de C-S-H principal responsable du développement des résistances mécaniques.

Le verre de recyclage présente une activité pouzzolanique qui augmente avec la finesse de ses particules. Comparées à une référence sans verre, des résistances à la compression équivalentes ou supérieures peuvent être obtenues en utilisant jusqu'à 40% de verre d'une finesse de 540 m^2/kg . Une légère mais significative activité pouzzolanique est détectée pour les grosses particules ($> 140 \mu m$), confirmée par la formation de C-S-H et un accroissement de 10% (5 MPa) de la résistance à la compression [17].

L'activité pouzzolanique varie aussi d'un verre à un autre, selon leurs 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 [18].

I.5.2. La poussière du four de la cimenterie

Les poussières de four à ciment sont produites dans le four au cours de la production du clinker. Ces poussières sont un mélange de particules de farine crue partiellement calcinée et qui n'a pas réagi, de poussières de clinker et de cendres, enrichies avec des sulfates alcalins, des halogénures et autres matières volatiles. Ces particules sont capturées par les gaz d'échappement et recueillies dans des dispositifs de contrôle de particules tels que les cyclones, filtres à manches ainsi que les précipitateurs électrostatiques [19].

Le remplacement d'une partie du ciment par des poudres minérales (CKD) réduira de façon significative la quantité de clinker à produire qui diminuera l'émission ensuite de CO₂ dans l'atmosphère tout en permettant de fabriquer des bétons durables en respectant l'environnement. Ces deux avantages favoriseront une évolution harmonieuse de l'industrie du béton entre la qualité du produit final et le respect de l'environnement dans un contexte de développement durable aussi bien dans les pays avancés que ceux en développement.

La composition chimique des poussières de four varie d'une cimenterie à l'autre en fonction de l'alimentation crue, du type d'opération, du type de four, de l'installation de collecte des poussières et du type de combustible utilisé. Ci-dessous, une composition type:

Tableau I.4 composition chimique type du CKD [20].

Élément	CaCO ₃	SiO ₂	CaO	K ₂ SO ₄	CaSO ₄	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	KCl	MgO	Na ₂ SO ₄	PF
%	55.4	13.6	8.1	5.9	5.2	4.5	2.1	1.4	1.3	1.3	0.4

Les principaux sels présents dans les CKD sont : le calcium, le silicium, le potassium, le fer et l'aluminium constituent les cations majeurs. En plus de ces éléments, des concentrations plus faibles de métaux lourds et d'éléments en traces peuvent être décelées.

I.6. Les adjuvants

I.6.1. Définition

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 du ciment permettant d'améliorer certaines de ses propriétés [21]. Ils fournissent au formulateur de béton une gamme étendue, variée et

nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur fabrication par temps froid ou chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés des bétons durcis, voire même lui conférer des propriétés nouvelles. Il existe plusieurs types d'adjuvant qui sont régis par la norme NF EN 934-2.

I.6.2. Adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau

Les superplastifiants ou les hauts réducteurs d'eau sont les adjuvants les plus importants pour le béton moderne [22], ils ont été préférés pour leur capacité d'améliorer les propriétés rhéologiques du béton et de lui conférer un meilleur comportement mécanique en diminuant le rapport E/C. Ils permettent, soit de réduire le dosage en eau à maniabilité constante, induisant donc un gain de résistance en compression, soit d'augmenter l'affaissement à teneur en eau constante.

Un grand nombre de superplastifiants existent sur le marché. Ce sont des polymères organiques constitués de groupes hydrophobes et d'autres hydrophiles. Les superplastifiants sont divisés en familles de produits parmi lesquelles nous citerons les principaux :

les polynaphtalènes sulfonés (PNS), Polymélanine sulfonate (PMS), Lignosulfonates modifiés (LS), Polycarboxylate(PC), Polyacrylate (PA) et Polyxyéthylène(POE).....

I.6.3. Mode d'action des superplastifiants

Les super réducteurs d'eau ou super plastifiants sont des molécules polaires qui présentent une extrémité fortement chargée, qui vient neutraliser un site opposé sur les grains de ciment.

Généralement, les grains de ciment anhydres sont chargés électriquement à leur surface, du fait de la rupture de liaisons électriques entre les cations et les anions pendant le broyage [23]. Le mode d'action des superplastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit: lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment, qui présentent un grand nombre de charges opposées (positives et négatives) sur leur surface, tendent à s'agglomérer sous forme d'amas (floculation). Par conséquent, cette floculation piège un certain volume d'eau entre les grains de ciment (eau captive) qui n'est plus disponible pour assurer une bonne maniabilité au béton.

Les superplastifiants en s'adsorbant à la surface des grains de ciment brisent cette dynamique. Ils neutralisent les différentes charges et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules et, par conséquent, la dispersion des grains de ciment libère de l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la maniabilité.

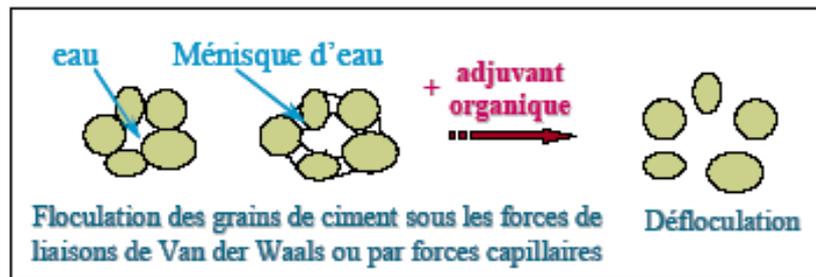


Figure I.5 : Défloculation des grains de ciment par l'adjuvant organique [24].

Les superplastifiants n'agissent pas tous de la même façon ; ceux à base de sulfonates (PNS, PMS et LS) par exemple, provoquent principalement une répulsion électrostatique entre les particules de ciment, tandis que les superplastifiants PC et POE sont plutôt efficaces grâce à un important effet stérique. Uchikawa et al [25] ont été les premiers à montrer l'existence de l'effet stérique des polycarboxylates, et à le comparer à la répulsion électrostatique due aux polymères des superplastifiants à base de PNS.

I.6.3.1. La répulsion électrostatique

Les superplastifiants s'adsorbent à la surface des particules de ciment par des interactions coulombiennes, des forces de Van der Waals ou des liaisons hydrogènes. En se fixant sur les grains de ciment, les polymères anioniques changent la charge des particules de ciment, comme le montre la figure I.6.

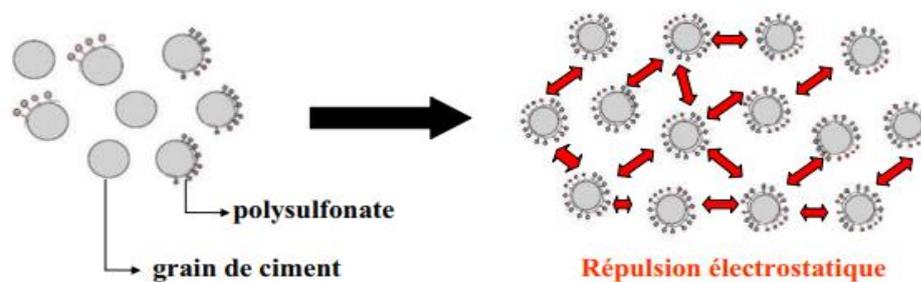


Figure I.6 : Dispersion des grains de ciment par la répulsion électrostatique.

Entre chaque grain de ciment occupé par les polymères, une force répulsive se forme en raison des charges identiques. Cette force provoque une forte dispersion des particules et empêche ainsi la coagulation [26].

I.6.3.2. La répulsion stérique

Les molécules s'adsorbent à la surface des grains de ciment par le biais des charges présentées sur la chaîne principale de la macromolécule et les groupes «chaîne secondaire» du côté de la chaîne. Ces dernières se prolongent dans l'eau environnant les grains de ciment. Il faut alors plus de temps pour que les hydrates du ciment recouvrent ces groupes. L'effet fluidifiant s'en trouve ainsi prolongé.

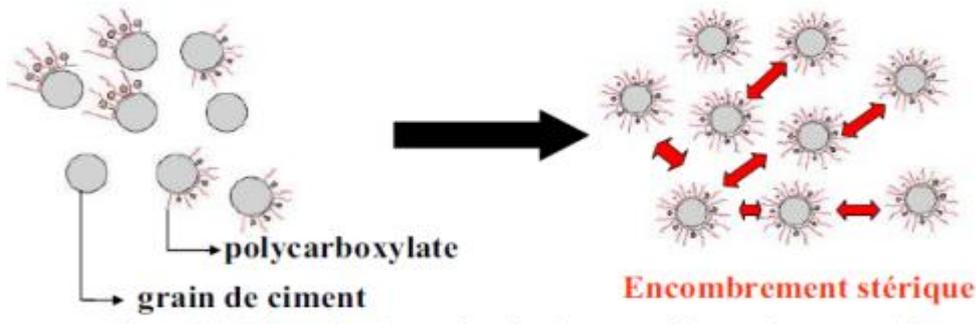


Figure I.7 : Dispersion des grains de ciment par l'encombrement stérique [27].

L'effet de dispersion des superplastifiants est lié à l'adsorption qui dépend de plusieurs facteurs tels que la quantité des C_3A , le taux d'alcalins dans le clinker, la finesse du ciment ainsi que le type et le dosage de sulfate de calcium utilisé pour régulariser la prise [28]. Leur présence dans un mortier de ciment influence également le flux de chaleur et le degré d'hydratation ainsi que la quantité des produits d'hydratation formés [29].

I.6.4. Facteurs influençant l'efficacité des superplastifiants

L'efficacité des adjuvants dépend d'une quantité de facteurs qui est, entre autres, le dosage de l'adjuvant, le type et le dosage en ciment, le dosage en eau ainsi que la consistance, les conditions de malaxage et la température.

- La structure des superplastifiants de type polycarboxylate a une influence décisive sur leur pouvoir fluidifiant. Les recherches de Yamada et al [30] ont montré que de longues chaînes secondaires conduisent, en général, à une fluidité plus grande et à une diminution de la viscosité plastique et du seuil d'écoulement. Par contre, un allongement de la chaîne principale a un effet négatif sur la fluidité. Il semble que ces effets s'expriment surtout pour de faibles rapports E/C.

- Le ciment : à maniabilité constante, plus les grains de ciment sont fins, plus il faut ajouter de superplastifiant. L'efficacité du superplastifiant dépend également du facteur $C_3A/CaSO_4$. Plus ce rapport est élevé, moins l'ouvrabilité sera augmentée.
- Le rapport E/C Pour un même dosage en superplastifiant, la maniabilité de la pâte sera augmentée lorsqu'on augmente le rapport E/C.
- Le moment de l'ajout : l'action des superplastifiants est tributaire du moment auquel on les ajoute au mélange. Ils sont moins efficaces lorsqu'ils sont directement ajoutés à l'eau de gâchage. En retardant quelque peu leur ajout, on laisse le temps aux sulfates de contrôler l'hydratation du C_3A . Les superplastifiants vont s'adsorber plus facilement sur les aluminates tandis que l'adsorption sur les grains de C_3S et C_2S se produit moins rapidement. Ce phénomène est explicable par le fait que les aluminates ont un potentiel zêta positif, contrairement aux silicates [31].
- La présence d'addition : en insérant de fines particules dans les mélanges, on peut supposer qu'une partie du superplastifiant s'adsorbe à la surface de ces éléments. Cette interaction n'est pas reprise dans les fiches techniques des superplastifiants et il n'est donc pas possible d'en tenir compte lors de la formulation des bétons.

I.6.5. Compatibilité entre le superplastifiant et le ciment

L'interaction entre le ciment et le SP est un phénomène de la surface et du physicochimique fort complexe. La morphologie de la surface des grains de ciment est très importante. L'efficacité des superplastifiants qui dispersent des grains de ciment et qui évitent ses floculations, est directement liée à l'adsorption des superplastifiants à la surface des particules. En effet, leur adsorption est influencée par les caractéristiques physiques et chimiques des particules de ciments.

Les superplastifiant au-delà de leur effet physique modifiant les forces interparticulaires, peuvent intervenir dans le processus chimique de l'hydratation, réagir avec le C_3A (aluminat tricalcique) ce qui peut bloquer la formation d'ettringite, et même empêcher ou retarder la mise en solution des sulfates de calcium présent dans le ciment [32].

La perte d'affaissement, le retard de prise, le raidissement ou la perturbation de la teneur en air entraîné sont tous synonymes d'incompatibilité ciment/superplastifiant [33].

I.7. Le bétons ordinaire et ses qualités essentielles

I.7.1. Définition

Le béton ordinaire est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde pour les réalisations des ouvrages de génie civil. Il est composé de granulats fins (sable) et de gros granulats (gravier), d'eau et de ciment. Ses composants sont déterminés dans des proportions étudiées afin d'obtenir des propriétés souhaitées telles que la résistance mécanique, la consistance, la durabilité, l'aspect architectural (formes, teintes, textures), la résistance au feu, l'isolation thermique et phonique, et ceci en utilisant des méthodes spécialisées dites « méthodes de formulation du béton ». Il est caractérisé essentiellement par une bonne résistance à la compression. Ses inconvénients résident dans sa mauvaise résistance à la traction ainsi que sa masse volumique relativement élevée.

I.7.2. La structure du béton

La structure du béton est composée de deux principaux constituants : la matrice et les granulats.

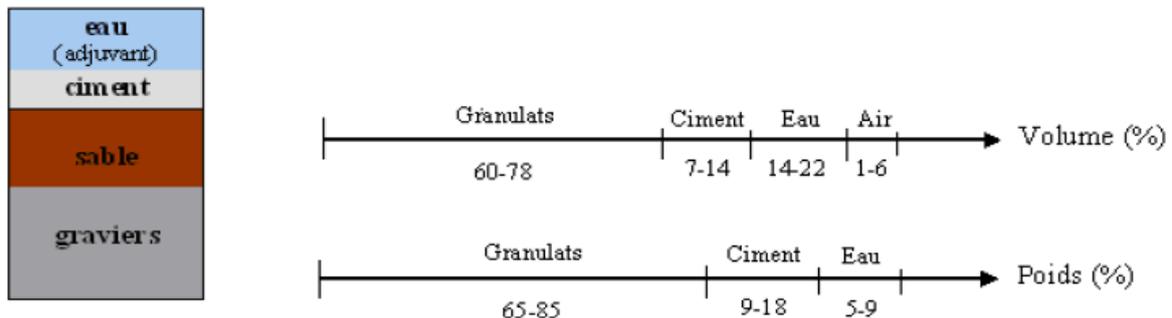


Figure I.8 : Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [34].

I.7.2.1. La matrice liante

La matrice liante enrobe et lie les granulats entre eux. Elle est formée d'une structure complexe poreuse source d'échanges interne et externe. La pâte de ciment correspond à l'ensemble ciment + additions + eau efficace + air + adjuvants. La pâte présente à l'intérieur du béton, joue à la fois le rôle de liant et de remplissage. Elle contribue à l'écoulement suivant un processus rhéologique lié essentiellement à sa viscosité. Celle-ci peut être présentée schématiquement comme une suspension de particules colloïdales suspendues dans un liquide newtonien qui est l'eau. Les forces colloïdales et la force de la pesanteur régissent alors complètement ses

propriétés macroscopiques.

I.7.2.2. Les granulats

Les granulats représentent en moyenne 70% à 80% du volume du béton, on les trouve sous forme de sables, de graviers ou de cailloux. Ils sont considérés comme un renfort mécanique, et ils sont traités comme des inclusions. Les granulats sont obtenus à partir des carrières de roches massives, de gisements alluvionnaires et artificiels tels que les laitiers expansés, les argiles expansées et les schistes expansés. Ils conditionnent la compacité du matériau ainsi que ses caractéristiques mécaniques.

Ils sont définis par la norme NFP 18-545, comme un ensemble de grains minéraux, destinés à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondations, de bases de roulement des chaussées et des assises et des ballasts de voies ferrées.

Les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et, dans certains cas, chimiques influencent les performances du béton. Par ailleurs, les granulats présentent un certain nombre de propriétés intrinsèques qui ne sont pas reliées à la nature du massif rocheux d'origine, telles la forme et la dimension des grains, la texture de surface et l'absorption, or toutes ses propriétés peuvent avoir une influence considérable sur la qualité du béton, autant à l'état frais qu'à l'état durci.

Pour que le squelette granulaire soit le plus compact et le plus durable possible, il est nécessaire que les granulats satisfassent à des exigences tant au niveau de leur nature et résistance (pétrographie, minéralogie), qu'au niveau des techniques de fabrication (taille, forme, rugosité).

La norme NFP 18-545 indique les caractéristiques auxquelles doivent satisfaire les granulats utilisés pour la confection des bétons hydrauliques, des chaussées et des voies ferrées. Le tableau ci-après reprend quelques-unes de ces spécifications. Pour certaines de ces caractéristiques, la norme indique des valeurs spécifiées, inférieures et supérieures : V_{si} et V_{ss} . Un granulat est désigné de catégorie A, B, C ou D lorsque toutes ses caractéristiques sont de catégorie indiquée A, B, C ou D.

Tableau I.5 : Spécification des sables à béton selon la norme NFP 18-545

Granularité	Catégorie	Passant en (%) à			Commentaires
		2 Dmax	1,58 Dmax	Dmax	
	A à D	Vsi 100	Vsi 99	Vsi 85 Vss 99	
Teneur en fines en %	A	Ls 10		e 6	Teneur en fines de la fraction 0-4 mm
	B	Ls 16			
	C	Ls 22			
	D	Non spécifié			
Module de finesse	A	Li 1,8 Ls 3,2	e 0,6		/
	B		e 0,7		
	C	e 0,7			
	D	e 0,8			
Absorption en %	A	Vss 2,5			/
	B	Vss 5			
	C	Vss 6			
	D	Non spécifié			
LA	A	Vss 40			/
	B				
	C	Vss 40			
	D	Vss 50			
Friabilité	A à D	Vss 60			
Propreté	A	Vsi 65			ES piston sur le 0-2 mm limité à 10 % de fines
	B à D	Vsi 60			
Valeur de Bleu VB	A à D	Vss 1			Essai sur 0-2 mm
Matière organique	Essai colorimétrique négatif				/
Soufre total en % (en poids)	A	0,4			Exprimé en S %
	B	1			
	C	1			
	D	1,5			
Sulfates exprimés en % de SO ₃ en poids	A- B - C	0,2			Si S total > 0,08 %
	D	0,8			
Impuretés prohibées	A à D	Vss 0,1 %			/
chlorures	A à D	Vss 0,01 %			/
Na ₂ O équivalent	A à D	Vss 0,01 %			/

Tableau I.6: Spécifications des gravillons à béton selon la norme NFP 18-545

	Catégorie	Passant en (%) à					
		2 D*	1.58 D*	D*	(d+D*)/2	d	0.63 d
Granularité	A	V _{si} 100	V _{si} 99	Li 80 Ls 99 e 15	Li 25 Ls 75 e 35	Li 1 Ls 20 e 15	V _{ss} 5
	B			e 19	Li 20 Ls 80 e 40	e 19	
	C				Pas de spécifications		
	D	Pas de spécifications					
	Catégorie	V_{ss}				Commentaires	
Los Angeles	A	30				/	
	B et C	40					
	D	50					
Propreté en %	A à D	1,5 : gravier non concassé 3 : gravier concassé Granulat alluvionnaire <3				Avec IC ≥ 50 et VBF ≤ 10 (VBF sur le 0/0,125 mm en g/Kg)	
Coefficient d'aplatissement en %	A	20				/	
	B et C	35					
	D	50					
Teneur en boules d'argiles	A à D	1				/	
Matière organique	Essai colorimétrique négatif					/	
Soufre total en % (en poids)	A	0,4				Exprimé en S %	
	B	1					
	C	1					
	D	1,5					
Sulfates exprimés en % de SO₃ en poids	A- B - C	0,2				Si S total > 0,08 %	
	D	0,3					
Impuretés prohibées	A à D	0,1 %				/	
chlorures	A à D	0,02 %				/	
Na₂O équivalent	A à D	0,01 %				/	

Avec : A, B, C et D : Classe de répartition des granulats

D* : Dmax de la granulométrie des granulats ;

V_{si} : Valeur spécifiée inférieure ;

V_{ss} : Valeur spécifiée supérieure ;

Li : Limite inférieure ; Ls : Limite supérieure ; e : étendue.

I.7.3. Formulation des bétons ordinaires

L'étude de la composition du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées.

Il existe de nombreuses méthodes de formulation de béton, comme par exemple celles de Dreux-Gorisses, de Bolomey, de Faury, d'Abrams, de Vallette et de Joisel. Elles sont de nature empirique. La méthode la plus pratiquée en Algérie est celle de Dreux-Gorisse [35]. Cette dernière méthode sera présentée ultérieurement dans l'Annexe A.

I.7.4. Propriétés d'un béton ordinaire

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

- le béton frais : mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage ;
- le béton durci : solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques entre ses constituants, d'une durée de quelques jours à quelques semaines.

I.7.4.1. Propriétés du béton frais

➤ La masse volumique

La masse volumique du béton frais est définie comme la masse d'un mètre cube de béton frais compact (volume des pores inclus) est décrit dans la norme européenne NF EN 12350-6.

Selon la classification européenne, il y a trois classes de béton qui sont représentées ci-dessous dans le tableau suivant :

Tableau I.7: Types de béton en fonction de leur masse volumique.

Types de béton	Béton léger	Béton normal	Béton lourd
Masse volumique (kg/m ³)	De 800 à 2000	De 2000 à 2600.	Supérieure à 2600

➤ Ouvrabilité

Est la propriété du béton fraîchement mélangé qui caractérise la facilité avec laquelle il peut

être malaxé et mis en place, ainsi que l'homogénéité de sa consolidation et la qualité finale de l'ouvrage au moment du décoffrage. Elle détermine la capacité du béton à être transporté, pompé et mis en place. Elle informe également sur sa fluidité, sa consistance, sa stabilité et sa tendance à la ségrégation. Dans le cas de bétons classiques, elle est principalement influencée par : la nature et le dosage du liant, la forme des granulats, la granularité, la granulométrie et le dosage en eau.

La norme EN 206-1 spécifie cinq classes de consistance S1 à S5 en fonction de l'affaissement (tableau I.8).

Tableau I.8: Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams.

Classe	Consistance du béton	Affaissement (en mm) au cône d'Abrams
S1	Ferme	10 – 40
S2	Plastique	50 – 90
S3	Très plastique	100 – 150
S4	Fluide	160 – 210
S5	Très fluide	≥ 220

➤ L'air occlus

Est le volume d'air relatif qui restera piégé dans le béton, même après la mise en œuvre. Les vides à l'intérieur du béton sont soit des bulles d'air piégé lors du malaxage soit des espaces laissés lorsque l'excédent d'eau contenu dans le béton s'évapore. À un degré moindre, il peut aussi y avoir des vides créés par la montée d'eau lors du ressuage. Différents auteurs ont décrit le mécanisme de piégeage de l'air occlus. D'après l'équation de Féret, le volume d'air joue le même rôle que le volume d'eau, au regard de la résistance [36].

Pour réaliser un mortier ou un béton le plus compact possible, il faut diminuer le volume d'eau sans augmenter le volume d'air occlus et par conséquent sans diminuer la maniabilité du mélange [37]. L'effet des vides provoqué par l'air occlus sur la résistance à la compression du béton est très important car la résistance du béton est une fonction directe de sa compacité et les vides provoqués par l'air occlus affectent la résistance à la compression de la même manière que les vides de toute autre origine. La présence de 5 % de vide dans le béton peut réduire la résistance de plus de 30 % et même un pourcentage de vide de 2 % peut produire une perte de résistance de plus de 10 % [38].

I.7.4.2. Propriétés du béton durci

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années

➤ Résistance à la compression

Une bonne résistance à la compression est la performance bien souvent recherchée pour le béton durci.

Le béton est caractérisé par la résistance à la compression R_{c28} mesurée sur des éprouvettes écrasées à 28 jours selon la norme NF EN 12390-3.

La norme EN 206 définit différentes classes sous la forme CX/Y (ex: C25/30). X est la résistance caractéristique (c'est-à-dire garantie dans 95% des cas) mesurée sur le cylindre 16x32 cm, tandis qu'Y est la résistance (du même béton) mesurée sur le cube 15x15x15 cm.

Tableau I.9: Classes de résistance à la compression

Classes	C8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50
f_{ck}-cyl (N/mm ²)	8	12	16	20	25	30	35	45
f_{ck}-cube (N/mm ²)	10	15	20	25	30	37	45	55

Cette résistance dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier le type et le dosage du ciment, la porosité du béton et le facteur E/C, rapport du dosage en eau au dosage en ciment, etc.

➤ Résistance à la traction

Elle est moins étudiée que la résistance en compression car le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression, et son comportement en traction est quasi fragile.

En général, la résistance à la traction dépend de la résistance à la compression. En effet, l'augmentation de la résistance à la compression mène vers l'augmentation de la résistance à la traction. Le comportement en traction du béton peut être identifié par l'essai de flexion sur trois points, désignée par F_{t28} .

La résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. Par exemple, la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer cette résistance [39].

I.8. Les bétons autoplaçants

I.8.1. Définition

Les BAP (bétons autoplaçants) sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans des coffrages très ferrailés. Depuis son apparition, l'utilisation du BAP n'a cessé d'augmenter, et ce grâce ses avantages multiples tout au niveau technologique, économique, environnemental qu'humain.

Ces bétons offrent un grand nombre de possibilités très intéressantes dans de nombreux domaines comme les dallages, la construction d'ouvrages d'art, le renforcement et la réparation d'ouvrages d'art (application de couches minces dans des endroits difficiles d'accès), les bétons coulés sous l'eau, les bétons confinés, les pieux et les systèmes pour la stabilisation des déchets.

I.8.2. La structure des BAP

Les BAP sont formulés différemment des Bétons ordinaire (figure I.9). Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau, de l'air et d'une addition minérale, est privilégiée au détriment des gravillons.

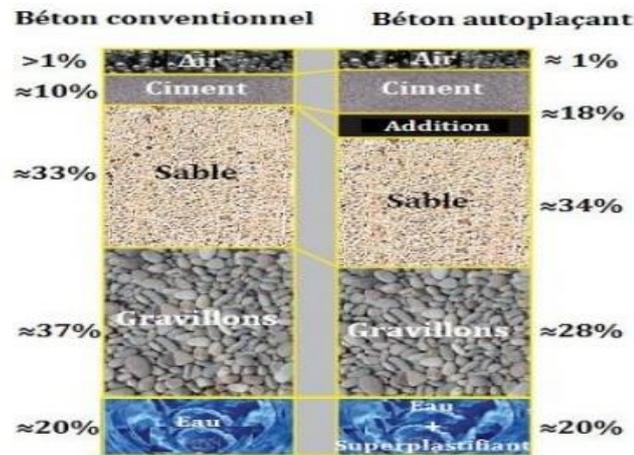


Figure I.9 : Compositions du béton autoplaçant et du béton conventionnel.

En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les bétons ordinaires, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition minérale qui sert de substitut aux gravillons. Cependant, cette formulation n'est pas suffisante pour atteindre la fluidité, il est donc nécessaire d'ajouter aux BAP un défloculant

(superplastifiant), sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée [40]. D'autres adjuvants chimiques tels que les agents colloïdaux (dit aussi agents de viscosité) peuvent être introduits afin d'empêcher la ségrégation et d'assurer une meilleure stabilité de béton. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

I.8.3. Propriétés des BAP à l'état frais

Les bétons autoplaçants se caractérisent par une grande fluidité et une bonne stabilité, une forte résistance à la ségrégation et au ressuage, une mise en place sous le seul effet de la gravité et une aptitude à s'écouler sans vibration dans des coffrages complexes et des ferraillements denses tout en donnant un aspect final homogène. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité de passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage.

I.8.4. Concept du béton auto plaçant

Après plusieurs recherches effectuées en laboratoires, les essais ont montré que la composition d'un béton autoplaçant doit avoir certaines caractéristiques:

I.8.4.1. Une quantité de fines importante

La composition des bétons autoplaçants comporte une quantité de fines importante (500kg/m^3 de diamètre inférieur à $80\ \mu\text{m}$) assurant la maniabilité et limitant les risques de ségrégation et ressuage. Le liant utilisé est généralement un mélange de deux ou trois constituants pour éviter l'élévation de température du béton lors de la prise de ce dernier.

I.8.4.2. Un volume de pâte élevé

Le rôle de la pâte (ciment + addition + eau efficace + air occlus) est de maintenir et de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferrailés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. Miura et al [41] ont montré l'intérêt d'utiliser de fortes teneurs en additions minérales afin d'obtenir à la fois une grande fluidité et une bonne stabilité du béton.

Le choix des additions et de leur teneur est réalisé en fonction des exigences de résistance à la compression à 28 jours et des exigences de durabilité tel qu'imposées par les normes applicables

(DTU21, norme XP P 18-305, etc.).

I.8.4.3. Utilisation d'adjuvant (superplastifiant)

Les adjuvants ont un double effet, électrique et stérique, qui leur permet de disperser au mieux les particules. L'ajout des super plastifiants confère aux BAP leur maniabilité. Cet ajout doit être proche du dosage de saturation et jamais très élevé sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneurs en eau vis-à-vis du problème de ségrégation et du ressuage [AFGC, 2000].

I.8.4.4. Éventuelle utilisation d'un agent de viscosité

Ces adjuvants sont souvent des polymères, composés de longues molécules organiques, qui augmentent la viscosité de l'eau de gâchage. Ils assurent une meilleure stabilité du béton et le rendent moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats, courantes en centrale à béton. Cependant, ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de maniabilité. À titre d'exemple, Khayat et al. [42] ont développé des formulations de bétons autonivelants qui ne présentaient aucun ressuage en utilisant 5 l/m³ de superplastifiant et 0,05% d'agent colloïdal. Ils ont également découvert que le tassement diminue avec l'augmentation de la teneur en agent colloïdal. L'utilisation de ces stabilisateurs de suspension est nécessaire pour des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Ils semblent inutiles pour les rapports eau/liant plus faibles correspondant à des résistances supérieures à 50 MPa.

Le mécanisme d'action des agents colloïdaux est fonction du type et de la concentration des polymères. Il peut être décomposé en trois phases [43] :

- Adsorption : les longues chaînes de polymères adhèrent à la périphérie des molécules d'eau par un phénomène d'adsorption et fixation d'une partie de l'eau. La quantité d'eau adsorbée dépend de la longueur des polymères et de leur surface spécifique ;
- Association : les molécules des chaînes de polymères adjacentes peuvent développer entre elles des forces d'attraction qui bloquent les mouvements de l'eau et provoquent la formation d'un gel qui augmente conséquemment la viscosité

- Entrelacement : Les chaînes de polymère peuvent s'entrelacer et s'emmêler spécialement dans des mélanges à forte concentration d'agent colloïdal. Cet entrelacement augmente la viscosité.

I.8.4.5. Un faible volume de gravillon

Lors de l'écoulement du béton dans des zones confinées, les gros granulats ont tendance à bloquer le passage et à interrompre l'écoulement du béton. Pour minimiser les risques de blocage, on opte pour des granulats de diamètre inférieur à 20mm (le diamètre maximal doit être compris entre 10 et 20 mm). Pour les BAP le rapport massique gravier /sable est proche de 1, pour la forme des granulats on peut utiliser des granulats roulés ou concassés.

I.8.5. Caractérisation des bétons à l'état frais

Pour évaluer les propriétés et les qualités à l'état frais d'un béton autoplaçant, plusieurs types d'essais normalisés et non normalisés ont été proposés. Certains évaluent la consistance et la déformabilité, tandis que d'autres s'intéressent aux mesures de la stabilité du béton. De nombreux tests simples ou empiriques ont été mis au point. Ces tests ont pour but de mieux caractériser le comportement du béton autoplaçant ou de valider son utilisation.

En France, trois essais de caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais ont été recommandés par l'Association Française de Génie Civil « AFGC » en juin 2000 [44]. Initialement provisoires, ces recommandations sont devenues par la suite des essais de référence.

I.8.6. Propriétés des BAP à l'état durci

Les résistances mécaniques d'un BAP sont comme pour la plupart des bétons, directement reliées à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment. Elles dépendent aussi de la composition du liant et de la valeur du liant équivalent. L'optimisation de ces paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistance jusqu'à des BAP à hautes performances : 95-100 MPa pour la résistance en compression à 28 jours. À résistance équivalente, l'évolution des résistances à la compression semble voisine pour les BAP et les bétons vibrés. À court terme, l'évolution des résistances peut même s'avérer plus rapide pour les BAP en raison de l'utilisation fréquente de fillers calcaires connus pour avoir un effet accélérateur sur l'hydratation des silicates de calcium. Aux très jeunes âges, les résistances des BAP peuvent être affectées lorsque ces bétons contiennent des quantités importantes de

superplastifiant (un dosage trop élevé pouvant conduire à un retard de prise conséquent). Il est possible cependant d'atteindre des résistances mécaniques élevées au démoulage en optimisant le choix et le dosage en adjuvant notamment.

Le rapport entre résistance en traction et résistance en compression des BAP est à priori peu différent des bétons traditionnels. Toutefois, il est conseillé, lorsque la résistance en traction présente une importance particulière, d'effectuer des mesures au niveau des essais de qualification de la formulation.

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant (et de la nature minéralogique pour l'alcali réaction).

I.8.7. Formulation des BAP

Réaliser un béton autoplaçant (BAP) est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP. De nos jours, il n'existe pas encore de méthode de formulation généralisée permettant de choisir précisément les proportions des constituants en fonction des propriétés souhaitées du BAP. Les méthodes actuelles sont toutes relativement complexes et essentiellement basées sur les résultats empiriques [45].

Les paramètres recommandés de formulation des BAP [AFGC, 2000], sont rappelées ci-après une quantité de pâte élevée (de l'ordre de 40% du volume total) ;

- une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/m³) ;
- utilisation d'un superplastifiant (à un dosage proche du dosage à saturation) ;
- un faible volume de gravillons (rapport G/S de l'ordre de 1) ;
- un diamètre maximal réduit ;
- éventuellement utilisation d'un agent de viscosité.

I.8.8.Exemples des méthodes de formulations des BAP

Parmi les techniques de formulation les plus répandues, nous citons :

I.8.8.1. La méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires

Cette approche est basée sur le modèle d'empilement compressible (MEC) développé par le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées [46]).

Il vise à estimer la compacité d'un mélange grâce aux caractéristiques du squelette granulaire qui le compose. Le modèle s'appuie sur les notions de compacité virtuelle et d'indice de serrage définie comme suit :

- La compacité virtuelle d'un mélange (γ) est définie comme étant, la compacité maximale qu'on pourrait avoir, en arrangeant au mieux possible la disposition des différents grains, du plus petit grain des additions aux plus gros granulats. En pratique, l'empilement des grains se fait de manière aléatoire et la compacité expérimentale ainsi obtenue, reste toujours inférieure à la compacité virtuelle.
- L'indice de serrage (K) est défini comme une grandeur représentative du degré de compaction d'une classe granulaire donnée. Ainsi pour chaque classe granulaire de diamètre moyen d_i correspond un indice de serrage k_i . Plus cet indice est élevé plus le contact entre les granulats d'une même classe est important et plus le seuil de cisaillement τ_0 est significatif.

Basé sous ces deux précédents concepts, Bétonlab Pro3 est un logiciel d'aide à la formulation des bétons. Le dernier de sa génération développée par le LCPC en 2008, permet de simuler la réalisation de gâchées de laboratoire. Le logiciel intègre le modèle d'empilement compressible, lui permettant l'optimisation d'une formulation de BAP suivant un cahier des charges précis comportant les données de compacité des fractions granulaires, les caractéristiques mécaniques des granulats, la demande en superplastifiant, la demande en eau du ciment et de l'addition. Il permet aussi la simulation de quelques propriétés des BAP, notamment, les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique), les résistances mécaniques, ainsi que les déformations différées, etc

I.8.8.2. La méthode basée sur l'optimisation du mortier (méthode japonaise)

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

- Dosage des gravillons : les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage

est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de Dosage du sable : le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

- Dosage du liant : la méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.
- Dosage de l'eau et du super plastifiant : les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

I.9. Conclusion

Dans le cadre de l'analyse bibliographique de cette première partie, nous soulignons des éléments importants dans notre synthèse qui ont orienté notre travail.

- Le ciment Portland est un matériau inorganique polyphasique. Il est principalement composé des quatre phases minérales du clinker (C₃S, C₂S, C₃A et C₄AF) et de sulfates de calcium. Des composés mineurs peuvent également être présents, en particulier des alcalins qui sont soit sous la forme de sulfates soit insérés dans le réseau cristallin des phases du clinker.
- Les additions minérales sont de granulométrie voisine de celle de ciment, voire plus fines, elles peuvent avoir un caractère hydraulique latent, soit avoir un caractère pouzzolanique, soit être inertes chimiquement. Leur introduction dans des mélanges cimentaires, modifie les propriétés à l'état frais et durci de ces derniers.
- Les superplastifiants sont utilisés pour améliorer les propriétés rhéologiques des systèmes cimentaires. Ces polymères anioniques s'adsorbent à la surface des grains de ciment et engendrent une dispersion des particules soit par une répulsion électrostatique pour les

polysulfonates soit par un encombrement stérique pour les polycarboxylates. Une amélioration de la fluidité est ainsi obtenue par la défloculation des grains de ciment et la libération de l'eau retenue dans les flocculats. Une diminution consécutive du seuil d'écoulement est alors observée.

- L'ouvrabilité et la résistance mécanique du béton ordinaire doivent être mises au point en premier lors de la formulation. En effet, la première contrôle la mise en œuvre sur chantier tandis que la deuxième conditionne la capacité portante de l'ouvrage. L'ouvrabilité est sensible au dosage en eau, en adjuvant et en fines. La résistance du béton est influencée par divers paramètres mais essentiellement contrôlée par la qualité du ciment et le rapport E/C. La fluctuation de ces paramètres de composition engendre des variations des propriétés prescrites.
- Les BAP doivent être en mêmes temps fluides et stables : nécessité de résistance à la ségrégation et au ressuage afin de consolider le mélange tout en assurant une suspension homogène pendant l'étalement, jusqu'au durcissement. Il n'y a pas de méthodologie pratique de formulation qui soit bien établie, afin de fabriquer des bétons fluides, à partir des données de base sur les matériaux locaux et un cahier des charges précis.

Chapitre II

Action des additions minérales et des
superplastifiants dans les matériaux à
matrice cimentaire

Chapitre II : Actions des additions minérales et des superplastifiants dans les matériaux à matrice cimentaire

II.1. Introduction

Les matrices cimentaires confectionnées avec des poly-additions minérales combinés à un superplastifiant ont fait l'objet de peu d'études car le mélange de matériaux de natures diverses n'est pas une opération simple, à cause des incompatibilités qui peuvent exister entre eux. Aussi, la mise en évidence des interactions éventuelles entre ses différents composants nécessite des outils complexes et performants. C'est pourquoi, jusqu' à l'heure actuelle, on ne dispose pas d'une approche suffisamment construite et approfondie qui nous permette de quantifier les effets de telles combinaisons, vis-à-vis des performances des matériaux cimentaires.

L'objectif de ce chapitre est d'éclaircir en particulier comment les additions minérales utilisées seules et les polyadditions associées ou non à un adjuvant chimique contribuent à l'activité liante du ciment et comment cette contribution liante influe sur les propriétés à l'état frais et durci des mortiers et des bétons confectionnés.

Pour atteindre cet objectif, nous présentons dans un premier lieu, les principaux effets des additions minérales sur les propriétés des matériaux cimentaires à savoir : l'effet filler, l'effet physico-chimique et microstructural ainsi que l'effet chimique. Ensuite on accentue notre recherche bibliographique sur l'influence des trois additions : filler calcaire, pouzzolane naturelle et le laitier granulé de hauts fourneaux sur les propriétés des mortiers et des bétons courants. Aussi, nous présentons une revue de la documentation sur les contributions des filler calcaires, de la poudre de verre et de la poussière de four de ciment sur les propriétés des bétons autoplçants. À la fin, nous exposons, quelques travaux qui se sont intéressés à la valorisation des fillers calcaires issus de concassage des roches calcaires.

II.2. Effets des additions minérales dans les matériaux à matrice cimentaire

Les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. À l'état frais, la présence des additions minérales 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 additions minérales interagissent dans le processus d'hydratation du ciment en modifiant la structure des produits hydratés. En plus, certaines additions peuvent réagir chimiquement en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire [47].

Ces ajouts confèrent aux bétons frais de meilleure qualité de maniabilité. Ils font augmenter la cohésion et entraînent donc une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton. Ils entraînent également une réduction de la chaleur d'hydratation et l'augmentation des propriétés mécaniques. D'un autre côté, les additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques [48].

Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes. Plusieurs auteurs s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions : un effet granulaire, un effet physico-chimique et un effet chimique.

II.2.1. Effet granulaire

Résulte des modifications apportées par l'addition sur la structure granulaire du matériau en présence d'eau ou d'adjuvant. Il conduit soit à l'amélioration de la consistance du mélange frais à quantité d'eau constante, soit à la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée. Cet effet se traduit également par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets bénéfiques sur les performances du matériau à l'état durci [49].

Cet effet dépend de plusieurs facteurs qui caractérisent les additions minérales (nature, qualité, finesse et morphologie). La figure II.1 illustre l'effet filler.

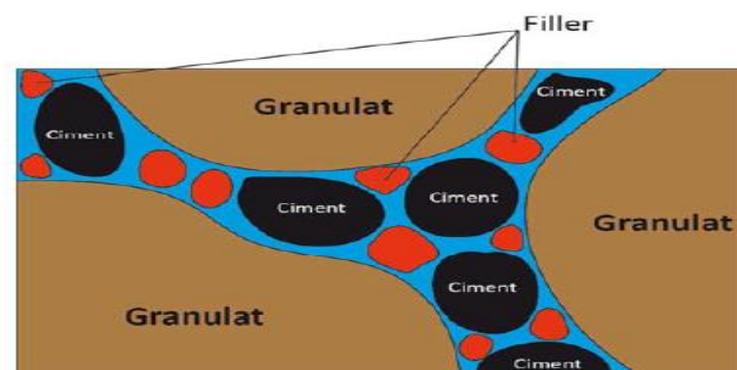


Figure II.1 : Illustration de l'effet filler [50].

II.2.2. Effet physico-chimique et microstructural

Cet effet est engendré par les différentes interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment. Il agit essentiellement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges ainsi que sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires durcis. Cet effet concerne toutes les additions minérales indépendamment de leur nature minéralogique [51].

II.2.3. Effet chimique

L'effet chimique est intimement lié à la composition minéralogique et concerne la capacité des additions caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ ou hydrauliques à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui peuvent contribuer à l'évolution des résistances mécaniques au même titre que les produits hydratés du ciment [52].

II.2.3.1. La réaction pouzzolanique

Il s'agit de la capacité d'un produit à former des C-S-H à partir des C-H [53]. D'une manière générale, cette réaction concerne principalement : les fumées de silice, les cendres volantes siliceuses (classe F), les pouzzolanes naturelles et les schistes calcinés. La silice amorphe présente dans ces différentes additions réagit en présence de l'eau avec la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formée durant l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratés C-S-H suivant la réaction suivante :



II.2.3.2. L'activité hydraulique

Concerne plus particulièrement les laitiers de hauts fourneaux et les cendres volantes calciques (classe C), qui en raison du caractère basique du milieu cimentaire, peuvent produire des C-S-H dont le rapport C/S est différent de celui issu des réactions pouzzolaniques.

Cette réaction est très lente d'où la nécessité de les broyer finement et de l'activer par ajout d'une base forte. On obtient ainsi des C-S-H et C_4AH_{13} . Lorsque le laitier est

incorporé au ciment, il réagit avec le gypse et forme l'ettringite. Le taux d'hydratation des ciments au laitier est faible au jeune âge comparé au ciment pur, il en résulte une baisse de la résistance à cet âge [54].

II.3. Effet des carboxylates sur les propriétés des ciments, des mortiers et des bétons

Les carboxylates sont des polymères qui affectent l'interface entre la surface des particules et la solution interstitielle et influencent les propriétés physiques telles que la viscosité et la limite d'élasticité de la pâte. L'effet de dispersion est lié à l'adsorption qui dépend de plusieurs facteurs tels que la quantité des C_3A , le taux d'alcalins dans le clinker, la finesse du ciment ainsi que le type et le dosage de sulfate de calcium utilisé pour régulariser la prise [28]. Leur présence dans un mortier de ciment influence également le flux de chaleur et le degré d'hydratation ainsi que la quantité des produits d'hydratation formés [29].

Shin et al, 2008 [55], ont déclaré que les polycarboxylates retardent l'hydratation initiale pour une longue durée, lorsque la masse moléculaire augmente puisque l'épaisseur de la couche d'absorption du superplastifiant interfère avec la diffusion des ions.

Puertas et al, 2005 [28] affirment que les molécules de superplastifiant entravent la diffusion de l'eau et des ions Ca^{+2} à l'interface du ciment solution. Les ions Ca^{+2} forment une couche avec les molécules de superplastifiant et empêchent la croissance et la nucléation des espèces riches en Ca^{+2} . En ajoutant le polycarboxylate au ciment portland, les auteurs ont remarqué que l'apparition des pics est retardée avec une magnitude qui augmente avec le dosage. La chaleur totale dégagée augmente de 296.4 pour un ciment non adjuvanté à 339 et 408.2 J/g lorsque le ciment est dosé respectivement de 0.5 et 1% de superplastifiant.

II.4. Présentation de cas de l'étude

Dans la suite de l'étude, nous ne traiterons que les cas des additions dont il est question dans cette étude, à savoir les fillers calcaires, le laitier de haut fourneau et la pouzzolane naturelle, la poudre de verre et la poussière du four de la cimenterie.

Nous nous proposons ici de répertorier les différents types d'interactions qui ont été proposés dans la littérature pour les cinq types d'additions utilisées dans le cadre de cette thèse.

II.4.1. Effets du filler calcaire sur les propriétés des ciments, des mortiers et des bétons courants

II.4.1.1. Action du filler calcaire seul

L'utilisation des fillers calcaires dans les matrices cimentaires est une pratique assez récente mais qui se développe continuellement un peu partout dans le monde à cause de ses bénéfices de ce matériau sur la maniabilité des liants hydrauliques et sur les propriétés mécaniques des bétons si on l'ajoute dans des petites quantités [56]. Parmi lesquels on peut citer :

- **Augmentation de la résistance initiale** [57] : les fillers calcaires accélèrent le degré d'hydratation du ciment et de ce fait l'action positive du filler sur les résistances est essentiellement marquée en ce qui concerne les résistances au jeune âge (entre 1 et 7 jours) et a tendance à être négligeable au long terme.
- **Amélioration de l'ouvrabilité du béton et besoins en eau faible** [58] : l'utilisation des fillers calcaires est généralement favorable à l'amélioration de la maniabilité d'un mortier ou d'un béton. Il est alors possible de réduire la quantité d'eau du mélange, entraînant en répercussion une hausse de la résistance.
- **Excellente densification de microstructure** [59] : la mouture des particules de calcaire, permet à ses grains de s'intercaler dans les pores créés par l'hydratation, entre les granulats et les produits d'hydratation, ce qui multiplie les liaisons microscopiques, développe l'adhérence granulat-matrice et par conséquent augmente la résistance des bétons étudiés aux fines calcaires.
- **Effet d'écartement des granulats** : l'ajout d'addition dans un béton, à teneurs en ciment et en eau constante, entraîne une augmentation du volume de la matrice et donc une diminution du volume des granulats. or, à même nature de la matrice, la résistance en compression est sensible à l'épaisseur maximale de la pâte [60], définie comme la distance moyenne entre deux gros gravillons adjacents. plus cette distance augmente, et plus la résistance diminue. Ce quatrième effet de l'incorporation d'additions est négatif.

II.4.1.2. Mécanisme de l'action du filler calcaire seul

Les études entreprises dans le domaine ont décelé que les fillers calcaires avaient principalement quatre effets :

- **Un effet filler :** les fillers calcaires sont généralement utilisés afin de combler le déficit en fines particules dans la courbe granulométrique des mortiers et bétons. Ils combleront également les vides qu'il y a entre les grains de ciments, diminuant les espaces libres entre ceux-ci.
- **Rôle physico-chimique:** la présence des fillers calcaires dans un mélange cimentaire conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment générant un accroissement du taux d'hydrates formés et une structuration de la matrice cimentaire plus efficace [51].
- **Effet chimique :** en présence du ciment, les fillers calcaires vont réagir pour former des carboaluminates de calcium hydratés. On observe une accélération de l'hydratation du ciment en présence d'eau par germination activée par des C-S-H. Ce phénomène est dû à la multiplication des sites de nucléation. Ce dernier effet n'est constatable qu'à court terme [61].
- **Rôle rhéologique :** par la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange frais et les résistances en compression aux jeunes âges du béton durci.

II.4.1.3. Paramètres influençant l'action du filler calcaire

➤ La finesse et la morphologie

Bessa, 2003 [62] explique que l'effet bénéfique de l'addition de fillers est dû au fait que, si les particules de fillers peuvent s'intercaler dans les pores du squelette granulaire, elles libèrent ainsi l'eau initialement présente qui peut désormais agir comme lubrifiant.

Boudechicha et al, 2007 [63] ont montré que l'étalement du mortier frais avec additions calcaires à une finesse inférieure à $5500 \text{ cm}^2/\text{g}$ croît jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment par l'addition, puis décroît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange pour les deux ciments utilisés. Par ailleurs l'utilisation de filler calcaire de

finesse supérieure présente un étalement qui décroît directement avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange, pour les deux ciments utilisés.

Pour donner aux mortiers avec fillers calcaires la consistance de référence, les mélanges avec additions calcaires de finesse inférieure à 5500 cm²/g présentent un besoin en eau plus ou moins proche de celui du mortier de référence et sont caractérisés par un besoin en eau plus faible que ce dernier pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 20 %, pour les deux ciments utilisés. Le besoin en eau des mortiers avec additions est directement lié aux phénomènes de l'empilement granulaire. Le besoin en eau dépend de la finesse et de la morphologie des fillers calcaires introduits.

De sa part, **Yahia et al, 2005** [64], ont conclu que l'addition excessive de fines particules augmente de manière importante la surface spécifique, ce qui conduit à une augmentation de la demande en eau pour une même maniabilité.

Gallias et al, 2000 [65], ont trouvé en travaillant à maniabilité constante que l'ajout de fillers calcaires entraîne une augmentation de la demande en eau. Des expériences ont été réalisées sur plusieurs types de fillers afin de mettre en évidence les paramètres influençant la demande en eau. Il en ressort que la surface spécifique n'est pas le seul paramètre déterminant. La forme des particules joue également un rôle non négligeable. Les particules dont la forme s'apparente à une sphère présentent moins de frictions que les particules angulaires. Elles ont alors un impact moins négatif sur la demande en eau du mélange.

Zaitri et al, 2015 [66] ont étudié l'influence des fines calcaires sur le comportement du béton ordinaire. Les principaux résultats obtenus montrent que la présence du calcaire à des taux de 5% à 10% améliore la maniabilité et la résistance mécanique à moyen et à long terme des bétons ordinaires par rapport à un béton témoin (BO 0%). Par contre, l'incorporation de calcaire au-delà de 12,5% conduit à un effet inverse. Le facteur le plus responsable de cette légère amélioration est la grande finesse de calcaire utilisé qui remplit un maximum de vides entre les grains de ciment et les granulats.

Buil et Paillere, 2000 [67], ont constaté que l'utilisation des fillers calcaires améliore les performances mécaniques des bétons. Cette amélioration provient du rôle actif exercé par ces particules dans l'hydratation du ciment.

➤ Taux de substitution

L'effet positif du filler calcaire précisé plus haut dépend fortement du dosage en filler.

Selon **Yahia et al, 2005** [64], pour un rapport E/C donné, l'addition de fillers calcaires jusqu'à un certain niveau n'affecte pas la fluidité du mélange. Par contre, à partir d'un certain dosage critique, l'incorporation de fillers engendre une augmentation de viscosité du mortier.

Michel et al, 2007 [10] ont annoncé que le maximum de résistance est généralement atteint avec un taux de substitution de 10%. Au-delà, l'effet du filler n'entraîne pas de modification des résistances ou alors entraîne une diminution.

Dans le même sens, **Tsivilis et al, 1999** [68] ont proclamé que l'incorporation de 10 % du calcaire a un effet bénéfique sur l'augmentation de la résistance à la compression. Une quantité supérieure à 10 % du calcaire diminue la résistance à la compression. Pour une quantité de calcaire de 20 %, la diminution de la résistance est de l'ordre de 13 %, pour 30 % de calcaire elle est de l'ordre de 29 %.

Dhir et al, 2007 [69] ont montré en examinant les performances du béton produit à l'aide de combinaisons de ciment Portland et de calcaire, recouvrant des compositions allant jusqu'à 45% de calcaire, que seulement des différences mineures sont enregistrées entre les bétons à base de ciment portland et ceux contenant 15 % de fillers calcaire pour un contenu de ciment et un rapport eau/ciment identiques.

II.4.1.4. Action combinée du filler calcaire et du superplastifiant

Selon **Nehdi et al, 1996** [70], en remplaçant une partie du ciment par du filler calcaire, ce dernier permet de réduire le dosage nécessaire en superplastifiant si on travaille à maniabilité constante. Plus la granulométrie est fine et plus le taux de substitution est élevée, plus la maniabilité de la pâte est améliorée. Ceci est en accord avec les observations de **Tsivilis et al, 1999** [68] Puisqu'ils expliquent que les ciments contenant du filler calcaire demandent moins d'eau que les ciments purs malgré leur petite granulométrie.

À son tour, **Boudchicha, 2007** [63] a étudié l'effet du taux de substitution (de 10 à 50%) du ciment par du FC, LG et de la pouzzolane (PZ) sur le besoin en adjuvant des mortiers. Il affirme que les mortiers avec additions calcaires et pouzzolanes (Ca1, Ca2, Pz1 et Pz2), de

finesse inférieure à 5500 cm²/g présentent un besoin en adjuvant plus faible que le mortier de référence pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 20 %. Au-delà de 20 % du taux de substitution du ciment le besoin en adjuvant commence à croître dans des proportions modérées en étant plus important pour les additions de pouzzolanes que pour les additions calcaires de mêmes finesses. Les mortiers C1 et C2 avec addition calcaire (Ca3) de finesse 8500 cm²/g et additions de laitier granulé de hauts fourneaux, présentent un besoin en adjuvant qui croit avec le taux de substitution du ciment.

Didouche et al, 2012 [71] ont étudié l'effet de l'addition d'un polycarboxylate sur les propriétés d'un mortier normalisé confectionné à base de ciment contenant 12% de calcaire. Le superplastifiants a été incorporé à différents dosages dans le mortier. Les résultats ont montré que le polycarboxylate améliore l'ouvrabilité de ces mortiers de 150%, retarde l'hydratation initiale du ciment, augmente le flux de chaleur, prolonge la période dormante et augmente les résistances mécaniques de 30%.

L'efficacité de ce type de superplastifiant peut être attribuée à sa nature chimique formée de longues chaînes moléculaires qui permettent de bien recouvrir les particules de ciment et d'assurer une bonne dispersion. L'améliore la résistance à la compression est dû à la diminution de la porosité de la pâte.

Nehdi et al, 1996 [70] Ont trouvé en étudiant l'effet du remplacement du ciment par du micro filler calcaire sur la performance mécanique des mortiers superplastifiés à faible rapport E/C que le remplacement du ciment n'a pas affecté de manière significative la résistance des mortiers au début de l'âge jusqu'à environ 10 à 15% en volume. Au-delà, les microfillers en calcaire ont causé des pertes significatives. À long terme, le remplacement du ciment par les microfillers calcaire au-delà de 10 à 15% a causé des pertes de résistance plus importantes.

II.4.2.Effets du laitier de haut fourneaux sur les propriétés des mortiers et des bétons courants

II.4.2.1.Action du laitier seul

Le laitier du haut fourneau est le matériau hydraulique latent, le plus utilisé dans la fabrication des ciments avec ajouts, partout dans le monde, vu ses propriétés stables, comparées à celles des autres sous-produits industriels. Les laitiers ont des propriétés très différentes suivant la composition chimique, et l'état plus au moins cristallisé, ou plus au moins vitreux (teneur en

verre) résultant du traitement effectué, et suivant la vitesse de refroidissement les laitiers de haut fourneau acquièrent des propriétés très différentes.

Le laitier de haut fourneau dans le béton améliore la résistance à la compression à long terme, réduit la chaleur d'hydratation [72] et la perméabilité [73]. L'efficacité du laitier dépend de sa réactivité hydraulique, qui est principalement influencée par la teneur en verre réactif, la composition chimique et la finesse [74].

D'après **Guetteche et Houari, 2002** cités dans [75] tous les types du clinker (de différentes compositions chimiques) réagissent avec le laitier finement broyé. Une légère différence apparaîtra dans la résistance obtenue (en particulier à moyen et à long terme). Les résultats montrent qu'une meilleure résistance est obtenue dans un ciment portland au laitier dont le clinker est soit riche en C_3S ou en C_3A , un clinker riche en C_3S et pauvre en C_3A active le laitier.

II.4.2.2. Mécanisme d'action du laitier seul

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C_3S et du C_2S (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux développe un PH égale à 12 (basicité de la solution sursaturée de la chaux) ce qui favorise la dissolution du verre du laitier. L'absence du réseau de SiO_2 explique la facilité de l'activation du laitier. La réaction du laitier est immédiate.

Selon **Guetteche et Houari, 2002** cités dans [75], quand on mélange le laitier finement broyé avec l'eau, les ions dissous sont presque inexistantes, on remarque une faible conductivité qui ne dépasse pas 0,6 ms/cm pour une surface spécifique du laitier de 6000 cm^2/g . Par contre avec l'ajout de 19 % du CPA et 5 % du gypse, la conductivité augmente considérablement selon les étapes suivantes :

- La dissolution des constituants du clinker et ceux du gypse.
- Les réactions continuent probablement pour former l'étringite et le C-S-H, ainsi la solution deviendra riche en Ca^{++} , la conductivité atteint 12 ms/cm.
- Le point de saturation en chaux est atteint, la portlandite se précipite, la conductivité se baisse après un pic de 12.5 ms/cm.

- La période finale est caractérisée par l'accélération des réactions et la précipitation de la portlandite, les ions sont consommés, la conductivité diminue lentement.

II.4.2.3. Paramètres influençant l'action du laitier de haut fourneau

➤ La Composition chimique

Comme il a été signalé dans le chapitre précédent, la composition chimique du laitier granulé varie suivant la nature du minerai, la composition du calcaire, la consommation de coke et le type de fonte fabriquée. Elle a de très grandes influences sur les performances des matériaux incluant le laitier dans leurs compositions.

Bougara et al, 2010 [76] ont conclu que la composition chimique a un effet significatif sur la réactivité du laitier. Les deux laitiers objets de leurs études avaient une teneur en verre, une finesse et une distribution en taille de particules similaires. Mais l'évolution de leurs chaleurs d'hydratation et le taux de développement des résistances sont différentes.

➤ La finesse et distribution de taille

L'activité d'un liant au laitier remonte en augmentant la surface spécifique du laitier de 2000 cm²/g à 4800 cm²/g, le temps de prise du ciment de laitier présentant une finesse plus de 5300 cm²/g est le même qu'un ciment portland. De même sa résistance mécanique augmente en augmentant la finesse du laitier [75]. Mais pour les conditions économiques il faut limiter cette finesse (pour obtenir ainsi un ciment performant et économique). Aussi, il a été établi que le laitier trop broyé ne se prête pas à un stockage de longue durée, il demande des quantités accrues d'eau lors de la fabrication d'un liant à sa base, ce qui compromet les propriétés physico- mécaniques du béton, d'où l'utilité d'utiliser les laitiers broyés à une finesse de 2200 à 3000 cm²/g qui est rentable du point de vue économique.

Sarkar et al, 1996 [77] avaient montré qu'avec un laitier broyé à une finesse de 800 m² /kg, on obtient une réduction significative de la chaleur d'hydratation du ciment, un béton à hautes résistances et à structure plus compacte.

Péra et al, 1998 [78] ont montré que plus la finesse de mouture du laitier est élevée, meilleures sont ses performances.

Wan et al, 2004 [79] Ont annoncé que la maniabilité du mortier augmente avec l'augmentation de la surface spécifique du laitier. Quatre échantillons (A, B, C et D) de laitier ont été utilisés. L'influence de laitier sur la fluidité du mortier est montrée dans le Tableau II.1. La fluidité de l'échantillon B et D a été bien meilleure que celle de l'échantillon A. La fluidité du mortier a été associée à des caractéristiques morphologiques des particules de laitier ; plus la surface des particules est lisse, plus la fluidité du mortier est meilleure.

Tableau II.1 : Les résultats des tests de la fluidité pour la surface et de tailles de différentes particules de laitier granulé [79].

Sample	Surface area (m ² /Kg)	Average diameter (μm)	Fluidity ratio (%)
Sample A	510	13,69	1,02
Sample B	685	9,12	1,06
Sample C	515	11,72	1,03
Sample D	512	13,15	1,06

Ils ont, aussi étudié la taille et la distribution en taille des particules de 3 échantillons de laitier broyés par différentes méthodes, ils ont conclu que malgré que les surfaces de Blaine des trois laitiers soient presque similaires, les caractéristiques géométriques et la distribution en taille des particules sont différentes. La distribution en taille des particules du laitier broyé par boule est plus large que celle du laitier broyé par vibreur, qui semble plus serrée. Ils ont observé que pour des échantillons ayant des surfaces spécifiques similaires, plus le mortier contient des particules fines de laitier < 3μm plus sa résistance est élevée.

Nacéri et Messaoudene, 2006 [80], ont varié, d'une part, le pourcentage du laitier dans le ciment et, d'autre part, la surface spécifique du ciment au laitier préparé par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par le laitier). D'après les résultats obtenus, ils ont conclu qu'un mortier confectionné à partir d'un ciment composé contenant jusqu'à 30% de laitier peut atteindre des résistances mécaniques comparables à celles d'un témoin sans laitier et que l'activité hydraulique et l'augmentation de la surface spécifique du laitier granulé de haut fourneau sont les principaux responsables de l'accroissement de résistance mécanique des mortiers testés.

Les laitiers granulé de haut fourneau sont utilisés dans le béton ils ne réduisent pas seulement la porosité mais aussi les pores deviennent fines et le changement dans la minéralogie des

hydrates du ciment conduit à la réduction de la pénétration des agents agressifs. Le laitier semble être effectivement utilisé dans le béton pour réduire les tailles des pores. Quand il réagit avec l'eau et l'hydroxyde de calcium CH, dans un milieu alcalin, ils forment les gels d'hydrates C-S-H par la réaction pouzzolanique. Pour une teneur en C-S-H élevée que représente le pourcentage élevé du laitier, il est apparu que la structure du béton est beaucoup plus dense [81].

Luo et al, 2003 [82] ont trouvé les mêmes résultats en étudiant la structure des pores de trois mélanges: ciment Portland, (ciment Portland +70% laitier) et (ciment Portland + 65% laitier + 5% gypse), ils ont observé que le nombre de pores de taille importante dans le mélange refermant le laitier est inférieure à celui d'un béton ordinaire où la structure des pores du béton ordinaire est nettement améliorée quand 70% de laitier est ajoutée, spécialement après 60 jours.

➤ Taux de substitution

Boubekeur et salhi, 2009 [83] ont étudié l'effet du laitier sur la résistance à la compression à court et à long terme sur des éprouvettes de mortier normal de dimension 40x40x160 mm. La présence du laitier dans la composition du ciment modifie les propriétés mécaniques. La substitution du ciment par du laitier a donné des résistances à la compression faibles à jeune âge (2 à 7 jours). Ceci est dû à la faible activité hydraulique du laitier granulé d'El Hadjar. Cependant, la résistance à la compression des ciments au laitier est similaire à celle du CEM I à 90 jours. Plus particulièrement, pour les résistances à la compression des ciments avec 20 % et 30 % de laitier dépassent celle du CEM I de 3 % et 4 % respectivement.

Dans l'étude expérimentale faite par **Nacéri et Messaoudene, 2006** [80], ils ont pu montrer que l'incorporation au-delà de 30% du laitier d'El hadjar à un mortier entraîne une diminution des résistances mécaniques. À l'âge de 28 jours et 90 jours, les mortiers contenant jusqu'à 30% de laitier avec une finesse de 3500cm²/g atteindront des résistances comparables à celles d'un mortier témoin sans ajout.

Par contre, **Kumar S. et al, 2004** [84] ont établi qu'en augmentant les quantités du laitier broyé par broyeur à usure (broyage interne et broyage séparé), les résistances au jeune âge et à

long terme des échantillons contenant 80% et 70% respectivement de laitier sont plus élevés que celle du ciment commercial, et que le laitier broyé séparément par broyage à usure peut remplacer le clinker en toute sécurité jusqu'à 80% sans détérioration des propriétés.

Le temps de prise des ciments au laitier est plus long que celui des ciments purs, dû au ralentissement de l'hydratation des laitiers [68]. Plusieurs travaux ont montré que l'effet de l'addition du laitier sur le temps de prise dépend de son dosage. Un dosage de 25% du laitier augmente le temps de prise par contre, une substitution de 50% raccourcit le temps de prise comparé aux ciments purs [85].

Wainwright et Ait-Aider, 1995 [86] ont étudié l'effet du laitier sur le temps de prise et la consistance des ciments. À partir de trois sources différentes de ciment et une % de laitier. Ils ont conclu que: les résultats de consistance et de temps de prise sont presque similaires pour tous les trois sources de ciments; le temps de prise des ciments a été augmenté avec l'augmentation de la teneur en laitier.

Wainwright et Rey, 2000 [87] rapportent l'influence de l'addition du laitier sur l'affaissement du béton. Quatre sources différentes de laitier (S1 à S4) pour un béton composé de rapport E/C= 0.56. Le Tableau II-2 donne les résultats de l'affaissement de ces mélanges.

Tableau II.2 : Proportions du mélange et l'ouvrabilité [87].

Mix	Mix proportions (kg/m ³)					Water/binder	Slump (mm)	
	OPC	GGBS	Fines	Coarse	Water			
OPC	300	-	750	1080	168	0,56	15	
55% GGBS	Source 1	135	165	750	1080	168	0,56	30
	Source 2	135	165	750	1080	168	0,56	20
	Source 3	135	165	750	1080	168	0,56	25
	Source 4	135	165	750	1080	168	0,56	45
85% GGBS	Source 1	45	255	750	1080	168	0,56	30
	Source 2	45	255	750	1080	168	0,56	40
	Source 3	45	255	750	1080	168	0,56	25
	Source 4	45	255	750	1080	168	0,56	20

➤ L'activation

L'activation chimique des laitiers des hauts fourneaux a fait aussi l'objet de nombreuses études en vue d'améliorer la résistance mécanique des ciments composés de ce déchet. Le ciment composé de laitier activé chimiquement peut donner des résistances à la compression

beaucoup plus élevées que celle du ciment Portland. Toutefois, les processus d'hydratation et de développement de la résistance mécanique du laitier chimiquement activé sont beaucoup plus compliqués par rapport au ciment Portland, cela est lié à de nombreux facteurs tels que la nature et le dosage de l'activateur, l'origine du laitier, le rapport laitier/eau et la température de cure. Les deux derniers facteurs peuvent affecter l'hydratation et les propriétés des silicates de calcium. Na_2SO_4 n'est pas très efficace pour l'activation de l'hydratation du laitier lui-même, mais il peut augmenter la résistance à la compression et modifier la structure du ciment composé de chaux-laitier de manière très significative [75].

Ezziane et al, 2002 [88] ont montré en étudiant l'efficacité du laitier d'El Hadjar par le concept du liant équivalent, que l'utilisation d'un taux élevé du laitier d'El Hadjar (40%) lui confère un déclenchement d'activité très précoce (2j), seulement cette activité ne sera jamais achevée à long terme (90j). Dans ce cas, un taux de 15 % paraît optimal.

➤ La température

Il est généralement accepté que l'augmentation de la température engendre une accélération de la réaction. **Ma et al, 1999** [89] ont conclu que la température suffisante pour activer le laitier doit être au-dessus de 40C° , mais au-dessous de cette température, la présence du laitier a pour effet de retarder l'hydratation.

II.4.2.4. Action combinée du laitier et du calcaire

Khalifa et al, 2012 [90] ont décelé l'influence de l'addition de fillers calcaires en pourcentages modérés (0%, 10% et 20%) sur les performances de formulations de liants contenant différents dosages en laitier de haut fourneau (variant de 20% à 80%), en considérant, comme paramètres d'analyse, la porosité accessible au mercure et les propriétés mécaniques. Les essais ont été réalisés sur 12 pâtes de liants composées avec un rapport Eau/Liant égal à 0,32. Les propriétés mécaniques des différentes pâtes ont été étudiées à plusieurs échéances (1 jour, 7 jours, 28 jours et 90 jours). Les résultats obtenus ont montré pour les 4 taux de substitution du laitier 0%, 30%, 50% et 80% que la substitution du ciment par du laitier de haut fourneau ou du filler calcaire engendre une diminution de la résistance mécanique et du module d'Young. L'effet combiné de ces « additions » sur l'évolution de la résistance mécanique dépend du dosage en filler calcaire. À 20% de filler calcaire, on

remarque que l'addition jusqu'à 30% de laitier ne diminue pas la résistance mécanique et le module de rigidité. Bien au contraire, à 10% de dosage en laitier, la résistance à la compression à 28 jours et 90 jours est supérieure à celle de la pâte de référence (0% de laitier et 0% de filler calcaire). Les résultats de la porosité totale, montrent que les pâtes à 20% de filler calcaire avec des dosages en laitier allant jusqu'à 30% ont une porosité nettement inférieure à celle de la pâte de référence. La porosité totale atteint son minimum (-26% par rapport à la porosité de la pâte de référence) à 30% de dosage en laitier.

II.4.3. Effets de la pouzzolane naturelle sur les propriétés des mortiers et des bétons courants

II.4.3.1. Action de la pouzzolane seul

La pouzzolane naturelle est un matériau naturel brut ou calciné ayant des propriétés pouzzolanique. Il contient principalement la silice sous forme réactive [91]. Son incorporation en ciment ou dans un système de béton offre de nombreux avantages tels que : réduction de la chaleur d'hydratation, diminution la porosité, augmentation de la densité [92], une meilleure maniabilité et l'amélioration de la résistance ultime [93]. Il est communément admis que l'effet de la pouzzolane naturelle est principalement régi par la quantité et la composition des phases vitreuses présentes [94].

II.4.3.2. Mécanisme d'action de la pouzzolane naturelle

Au cours de l'hydratation du ciment Portland il se forme sur chacun des grains une couche de produits d'hydratation, principalement du C-S-H, qui devient de plus en plus épais, alors que l'hydroxyde de calcium également formé se sépare partiellement de la solution interstitielle sous forme de cristaux hexagonaux en paillettes. Ces derniers réagissent à leur tour avec la silice et/ou l'alumine de la pouzzolane pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et/ou d'aluminates de calcium hydratés (C-A-H).

Les C-S-H et les C-A-H sont des produits insolubles possédant des propriétés liantes [95]. Ils remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance mécanique et l'imperméabilité des matériaux, par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en C-S-H et C-A-H cristallisés [96]. L'accroissement de la résistance mécanique qu'elle provoque prend toute son ampleur pour les longues échéances [97].

➤ La finesse et la morphologie

La finesse des particules de pouzzolane favorise leur effet physico-chimique. La présence d'un grand nombre de particules submicroscopique dans la matrice cimentaire autour des grains de ciment multiplie les possibilités de germination des produits hydratés et développe la complexité microstructurale et l'efficacité des liaisons [62].

Boudchicha et al, 2007 [63] ont étudié l'effet de la finesse de la pouzzolane sur la demande en eau et sur la résistance en compression des mortiers sans adjuvants et des mortiers adjuvantés. Ils ont trouvé qu'une finesse supérieure à celle du ciment ($\sim 5000 \text{ cm}^2/\text{g}$), est nécessaire pour garantir des améliorations en matière de résistance.

Les mortiers avec additions pouzzolanes de finesse inférieure à $5500 \text{ cm}^2/\text{g}$ présentent un besoin en eau plus ou moins proche de celui du mortier de référence et sont caractérisés par un besoin en eau plus faible que ce dernier pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 20 %, pour les deux ciments utilisés.

➤ Taux de substitution

L'addition d'une pouzzolane naturelle au ciment Portland entraîne un accroissement du temps de prise attribuable en partie à l'effet de dilution (c'est-à-dire la dilution de l'ingrédient le plus actif, soit le ciment Portland et en partie à l'augmentation de la teneur en eau nécessaire pour préparer une pâte d'une consistance normale.

Pour les pouzzolanes naturelles, l'incorporation d'une quantité qui peut aller jusqu'à 50% en substitution de la masse du ciment peut retarder la prise de la pâte. Ce retard de temps de prise pourrait être dû à la diminution de la vitesse du processus d'hydratation ce qui peut être une qualité recherchée pour les gâchages en temps froid [98].

Mansour et al, 2010 [99] ont tenté d'évaluer le rôle de la pouzzolane sur les propriétés physicochimiques des suspensions de ciments, les propriétés mécaniques et le retrait. Pour cela, une étude comparative a été menée entre un ciment de référence (sans pouzzolane) et un ciment contenant un taux de remplacement de 10 % de pouzzolane substituée au ciment. Les résultats de cette étude montrent que l'utilisation de la pouzzolane ralentit la formation des hydrates et par là même, le début de la prise de la pâte cimentaire; ce qui favorise

l'écoulement et la maniabilité du mortier et du béton. Les résistances mécaniques sont plus faibles aux courtes échéances mais après un mois de conservation, elles atteignent des niveaux similaires à ceux des mortiers sans pouzzolane.

Chaib et al, 2015 [100] ont établi une étude expérimentale qui consiste à préparer un ciment normalisé avec addition minérale en remplaçant un certain pourcentage de clinker par l'ajout pouzzolanique (20%, 30%, 35%, 40% et 50%). Les résultats obtenus montrent que la consistance est proportionnelle aux taux d'ajouts, plus le taux augmente plus la consistance augmente. Les résistances de ces mortiers augmentent en fonction du taux de substitution de la pouzzolane mais restent inférieures à celle du mortier de contrôle et cela pour tous les âges. Au jeune âge, l'augmentation du taux d'ajout a un effet négatif sur la résistance à la compression, mais une fois l'âge devient important la résistance augmente.

À long terme et pour un taux de pouzzolane de 20 % la résistance à la compression s'approche de la résistance de référence. En effet, Il ressort que la quantité d'ajout pouzzolanique, et la composition chimique du ciment confectionné sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers testés.

Ce travail de recherche confirme aussi que les taux de 20% et 30% de pouzzolane contribuent positivement à l'amélioration de la durabilité de la construction.

Benkaddour et al, 2009 [101] ont étudié l'effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (gisement de Bouhamdi) sur les résistances mécaniques des mortiers. Les résultats obtenus sont : la résistance à la compression diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge surtout à 2j, 7j et 28 jours. À titre d'exemple un remplacement du ciment de 30% de PN diminue la résistance à la compression de 36.68%, 6.16% et 24.45% à 2j, 7j et 28 jours respectivement par rapport à un mortier témoin sans pouzzolane. Cette diminution de la résistance est attribuée principalement à l'activité lente de la pouzzolane naturelle. Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane naturelle et artificielle et le Ca (OH) 2 libéré par l'hydratation du CPA ce qui donne à la pouzzolane naturelle la propriété de fixer la chaux. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances (effet de retardateur de prise). La résistance à la compression du mortier contenant 10% PN rejoint celle du témoin à 28 jours. La pouzzolane naturelle améliore la résistance à la compression à

long terme, car elles donnent naissance à un second C-S-H qui améliore le remplissage des pores, puis augmente la résistance mécanique.

Belaribi et al, 2003 [102] se sont intéressés à étudier l'influence de la pouzzolane de Beni-saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons. Pour cela ils ont confectionné un béton de référence et trois bétons à base de pouzzolane (20, 25 et 30 %) et ont mesuré les résistances à la compression à différentes échéances. La principale conclusion à laquelle ils ont abouti est que substituer 20 % de pouzzolane de Béni-Saf au ciment Portland confère au béton, dans lequel elle est incorporée, des performances mécaniques qui égalent sinon surpassent à long terme celle du béton témoin. C'est donc le taux de 20 % qui semble selon leurs résultats être le dosage idéal.

II.4.3.4. Action de la pouzzolane combinée au calcaire et /ou superplastifiant

Le taux d'addition d'activateur chimique (adjuvant) influe sur la réactivité pouzzolanique des ajouts, et par conséquent sur la résistance mécanique du ciment composé. Par exemple, l'addition de petite quantité de sulfate de sodium (Na_2SO_4) ou de chlorure de calcium (CaCl_2) peut améliorer la réactivité pouzzolanique des cendres volantes en augmentant la résistance mécanique. Ces activateurs ont une influence prédominante sur la résistance au jeune âge, mais à long terme leur influence change selon leurs pourcentages et la nature d'ajouts utilisés. Les analyses par diffraction des rayons X (DRX) ont montré que l'addition de Na_2SO_4 forme d'avantage l'ettringite (AFt), par contre CaCl_2 conduit à la formation d'une solution solide de chloro-aluminate calcique hydraté ($\text{C}_4\text{AH}_{13} \cdot \text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

Mohammed Belhadj et al, 2016 [103] ont étudié l'influence de l'incorporation de la pouzzolane naturelle dans les mortiers en variant le taux d'ajout de la pouzzolane et le taux de l'adjuvant. Le rapport E/C (eau /ciment) est maintenu constant. Les résultats de cette étude ont permis de constater que la présence de la pouzzolane avec adjuvant à base de polycarboxylate a augmenté la résistance à la compression du mortier par rapport au mortier de référence d'environ 30%.

L'ajout de 10 % calcaire et des petites quantités de pouzzolane naturelle (0-10 %) donne des résistances maximales à la compression aux jeunes âges (2, 7 et 28 jours). Dans ce cas, la résistance à la compression augmente de 16 % par rapport à celle du mortier de contrôle. Cependant, à long terme (90 jours), la résistance à la compression est maximale

pour une combinaison de 10 % de calcaire et 20 % de pouzzolane, la résistance est améliorée de 7 % par rapport à celle du mortier de contrôle [104]. Le calcaire donne une bonne résistance aux jeunes âges, tandis que la pouzzolane augmente la résistance à long terme.

Aichouba et al,2005 [105] ont montré en étudiant l'effet de la pouzzolane naturelle de Béni- saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire, que la substitution du ciment par la pouzzolane de 10 à 30 % engendre une augmentation de la consistance normale, une diminution du temps de prise, une diminution des résistances mécaniques à jeunes âges et une conservation de ces résistances à long terme.

II. 4.4. L'utilisation combinée des additions minérales

II.4.4.1. L'utilisation sans adjuvants

Chabi et al, 2004 [106] ont étudié l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers. Leur investigation s'est intéressé à optimiser une composition d'un ciment en utilisant comme ajouts actifs la pouzzolane, le laitier, ou le silex en proportion variable, en étudiant les propriétés physico-chimiques et l'influence sur le comportement mécanique des mortiers, et bétons, afin d'aboutir à quelques améliorations concernant : l'économie, les propriétés physiques, le comportement mécanique, la durabilité.

Les résultats des résistances en compression et en flexion sur mortiers en fonction du pourcentage de pouzzolane et de laitier, aux différents âges sont rapportés sur les figures II.2 et II.3. Ces figures montrent que pendant les premiers âges, la résistance est faible pour tous les échantillons.

La réaction pouzzolanique se produit par consommation de portlandite, en même temps que l'on mélange le clinker portland et le laitier de haut fourneau. Une petite réaction immédiate du laitier se produit et qui libère des ions calcium et aluminium dans la solution. Par la suite le laitier de haut fourneau réagit avec les hydroxydes alcalins puis avec l'hydroxyde de calcium libéré par le clinker pour former alors les CSH. Au-delà de l'âge de 28 jours (à 90 jours), le taux d'augmentation de la résistance à la compression des mortiers contenant de la pouzzolane et de laitier est de l'ordre de 86% et 68% par rapport au mortier témoin et ce pour les pourcentages (20P, 10L) et (15P,15L). Ces résultats confirment la propriété latente de l'hydratation des ciments avec la pouzzolane et le laitier.

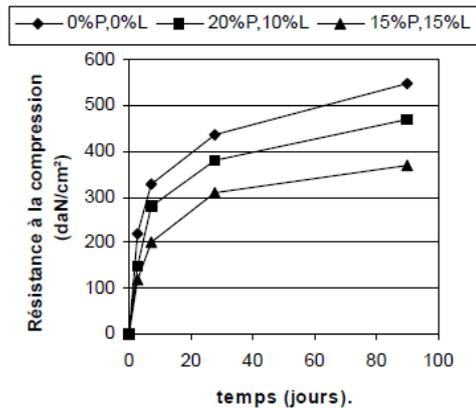


Figure II.2 : Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage de pouzzolane et de laitier.

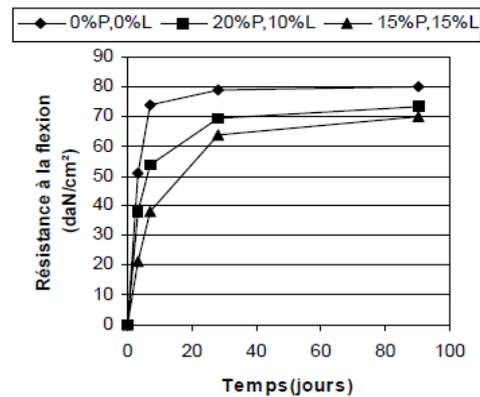


Figure II.3 : Résistance du mortier à la flexion (daN/cm²) en fonction du temps et du pourcentage de pouzzolane et de laitier.

II. 4.4.2. L'utilisation avec superplastifiant

Kerbouche et al,2009 [107], ont étudié les effets de l'incorporation d'ajouts minéraux tels que : la pouzzolane naturelle, fillers calcaire et fumée de silice sur les propriétés mécaniques des mortiers élaborés selon les différentes combinaisons à base de ces ajouts en utilisant un adjuvant plastifiant réducteur d'eau (PLASTIMENT HP) avec un dosage de 2% du poids du ciment.

Les résistances à la compression des mortiers contenant à la fois de la pouzzolane naturelle et les fines calcaire aux échéances 2, 7, 28 et 90 jours sont reportées à la figure II.4.

Les résultats de ce travail montrent que le taux de 10% de fillers calcaire (FC) améliore la résistance des mortiers binaires au jeune âge (2 jours), par contre les taux de 30% de pouzzolane naturelle (PZN) et 10% de fumée de silice (FS) contribuent positivement à long terme (90 jours). Concernant les mortiers ternaires les couples (10-30% PZN / 10% FC) et (10-30% PZN / 10% FS) semblent les plus efficaces car ils développent des résistances comparables à celle du mortier contrôle à long terme (90 jours).

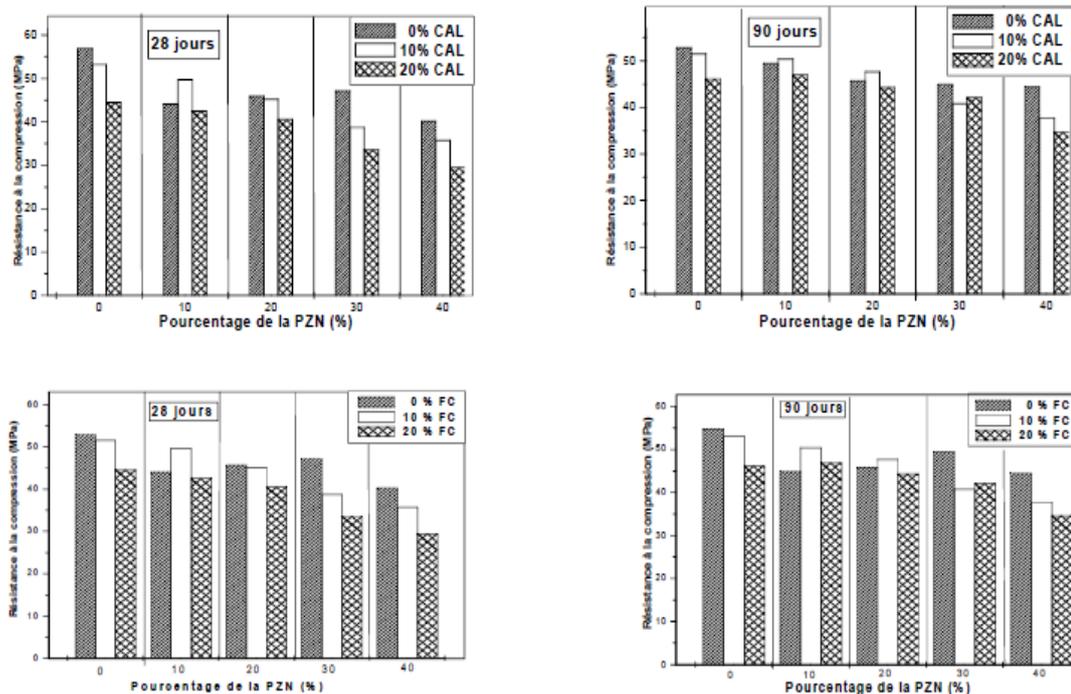


Figure II.4: Évolution de la résistance à la compression pour différentes combinaisons CPA / PZN / FC [107].

II. 4.5. Influence de poudre de verre dans la formulation du béton autoplaçant

L'utilisation de la poudre de verre en tant qu'ajout cimentaire alternatif a fait l'objet de plusieurs recherches depuis une quinzaine d'années. Il est montré que la PV a une pouzzolanité similaire, voire supérieure à celle des cendres volantes [108]. Il est montré aussi que l'incorporation de 25 à 75% de PV améliore l'ouvrabilité, les résistances mécaniques.

Les résultats obtenus par **Schwarz et al, 2008** [109] sur l'influence de l'ajout de poudre de verre sur la résistance en compression de la pâte de ciment, montrent qu'à jeune âge (1 à 28 jours) la résistance en compression de ces derniers diminue avec l'augmentation de la quantité de PV. Selon eux cette baisse de la résistance est due à une augmentation du rapport E/C effectif qui résulte en une baisse de la quantité d'éléments pouvant s'hydrater rapidement. Cette baisse de la quantité d'éléments réactifs à jeune âge entraîne également une augmentation de la porosité du béton à jeune âge.

Zeghichi et al, 2012 [110] ont traité à partir de leur étude l'influence de l'addition de la poudre de verre broyé sur le comportement physique et mécanique du ciment CPA et du ciment blanc en variant le pourcentage d'ajout de 10%, 20%, 25%, 30% et 35%.

Les résultats obtenus montrent qu'une substitution partielle de 10% à 25% semble être favorable, au-delà de cette limite les propriétés mécaniques sont affectées. Pour une teneur de 10%, la résistance atteint une valeur maximale ce qui peut s'expliquer par le rôle de la poudre qui comble les interstices granulaires et rend le mélange plus compact.

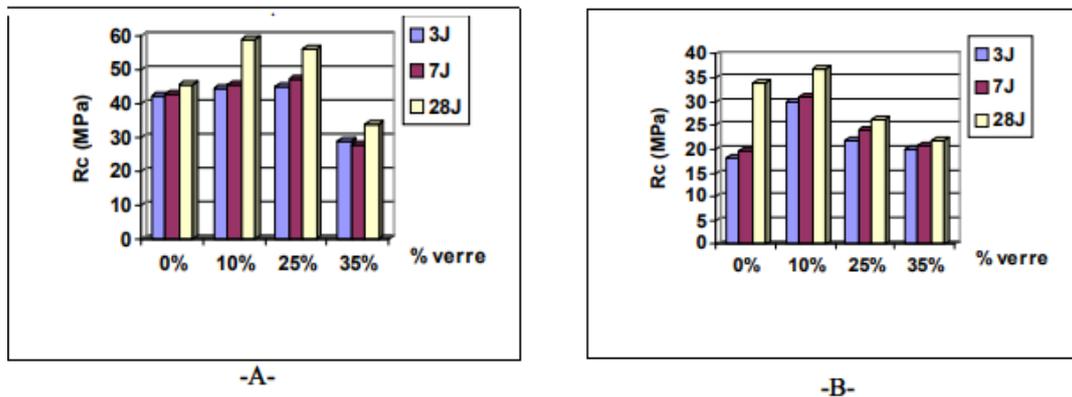


Figure II.5 : La résistance en compression du mortier en fonction de la teneur en verre [110].

Ali Boucetta et al, 2013 [111] ont étudié l'influence du déchet de l'industrie (laitier granulé) et des déchets ménagers (verre à bouteille) et du filler calcaire en substitution sur les propriétés des BAP à l'état frais et à l'état durci.

Les résultats obtenus ont montré que toutes les additions améliorent de façon remarquable l'étalement. L'augmentation du volume de pâte par l'introduction des additions a entraîné la réduction des frottements des granulats par leur dispersion en améliorant l'écoulement des BAP. Cependant au-delà d'un dosage critique de 45 % d'addition, l'étalement diminue par effet de l'augmentation de la concentration volumique en solides, mais reste largement supérieur à celui donné par le BAP de référence.

L'influence des additions minérales sur l'écoulement des bétons est fonction de leur dosage et de leur nature chimique (inerte ou active). Les particules fines de l'addition 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. Cependant, au de-là d'un dosage critique, la viscosité du mortier augmente avec l'ajout de l'addition.

Le filler calcaire garantit les valeurs maximales de l'étalement par rapport au laitier granulé et la poudre de verre. En effet, certaines additions à caractère pouzzolanique comme la poudre de verre et le laitier granulé, leur écoulement dépend de deux composantes: une

composante physico- chimique et une composante granulaire liée aux frottements des particules.

L'emploi des additions a permis d'absorber l'eau de ressuage en augmentant le volume de pâte et a permis aussi l'amélioration de la stabilité des BAP. Ils notent toutefois un dosage optimal d'addition de l'ordre de 45 %, au-delà duquel la stabilité diminue par augmentation de concentration volumique en solides de la pâte, le mortier devient trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis.

Ils ont aussi confirmé que le filler calcaire améliore les résistances mécaniques à court terme des bétons autoplaçants, ces dernières ayant tendance à se stabiliser au-delà de 28 jours. Le laitier granulé et le verre réduisent la porosité parallèlement à l'augmentation de la durée de cure, et permettent ainsi d'obtenir de meilleures résistances à plus longues échéances, principalement par effet hydraulique et pouzzolanique, significatifs au-delà de 28 jours à cause d'une densification de la matrice cimentaire.

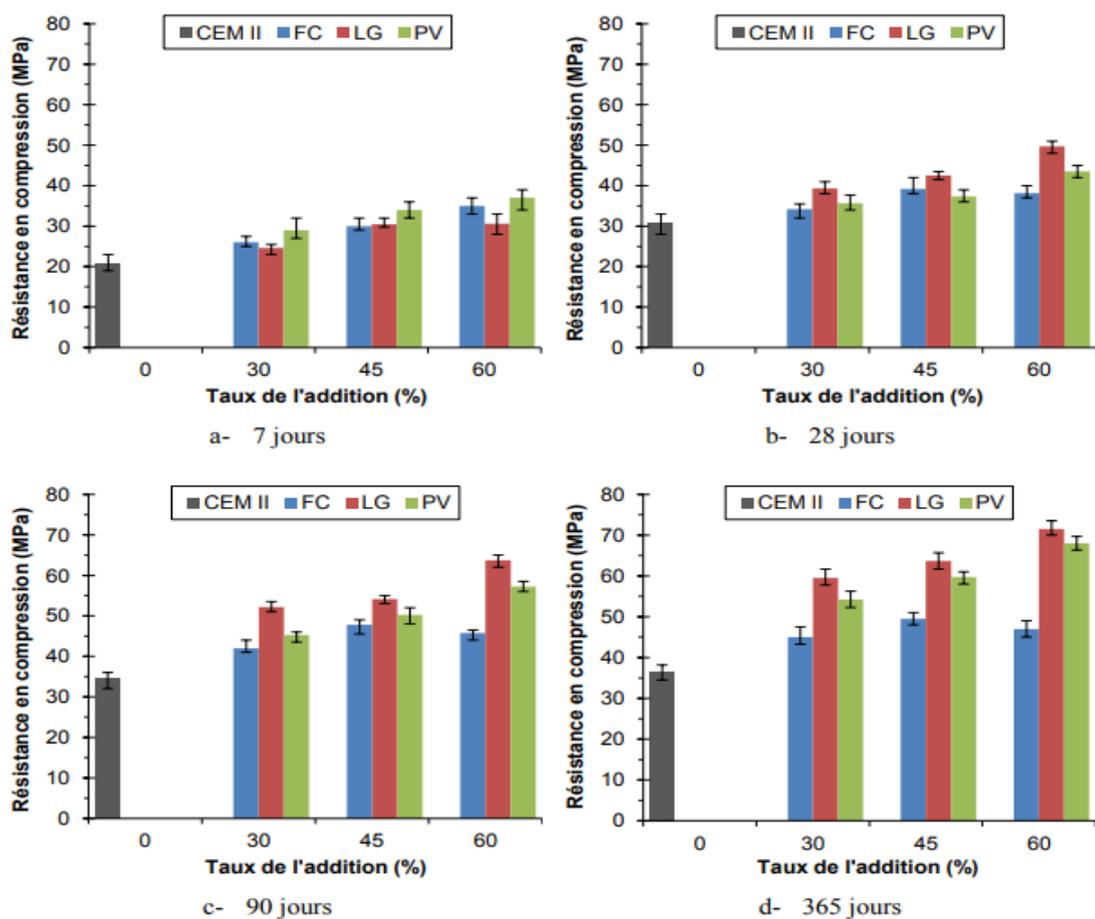


Figure II.6 : Influence du dosage en addition sur la résistance en compression à différents âges [111].

Chekireb et al, 2015 [112] ont évalué l'effet de la poudre de verre (PV) sur la rhéologie des pâtes de ciment et sur les performances des BAP à l'état frais et durci. Tous les mélanges de pâtes et de BAP sont préparés avec un rapport E/L de 0,42. Différents pourcentages de remplacement du ciment par la PV, allant jusqu'à 40% en masse de liant total, sont étudiés dans des matrices binaires et ternaires. Dans le cas des systèmes ternaires, la fumée de silice est utilisée à 3% en masse de liant. D'autre part, la cendre volante classe F (CV) et le laitier de haut fourneau (L) sont utilisés à des fins de comparaison.

Les résultats des essais montrent que la PV réduit la demande en superplastifiant en comparaison avec la CV et L. En outre l'utilisation de la PV n'affecte pas la viscosité plastique, mais diminue significativement le seuil de cisaillement des pâtes étudiées. D'autres parts, le remplacement partiel du ciment par la PV améliore l'ouvrabilité, la rhéologie et la stabilité des BAP binaires et ternaires sans l'emploi d'un agent de viscosité. Les propriétés mécaniques ainsi que la résistance à la pénétration des ions chlorures et la résistance au gel-dégel des BAP incorporant la PV sont comparables voire meilleures que celle du témoin dépendamment du pourcentage de remplacement.

Bensalem et al, 2017 [113] ont étudié 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 hauts fourneaux dans la fabrication des bétons autoplaçants. L'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 a montré 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.

II. 4.6. Influence de la poussière du four de ciment

L'utilisation de CKD comme un ajout au ciment portland a été évalué par un certain nombre de recherches. **Hussein et al, 2016** [114] ont étudié la possibilité d'élaborer un nouveau ciment moins coûteux et respectueux de l'environnement en utilisant la poussière de four de ciment.

Les résultats obtenus des différents essais réalisés ont montré que la substitution de : 1, 2, 3, 4, 5, et 10% en poids de ciment par la poussière de four de cimenterie (CKD) a produit une

poudre très fine avec une surface spécifique qui varie entre 3240 m²/g et 3460 m²/g. Ce qui assure la facilité de l'hydratation lors du gâchage de bétons, tout en augmentant le temps de prise de mélange et améliore par la suite les propriétés mécaniques de produit final.

Le CKD affecte négativement les propriétés mécaniques des mortiers contenant du ciment portland ordinaire, en particulier à des taux de substitution élevés. La substitution du ciment par du CKD jusqu'à 6% n'a pas d'effet clair sur la résistance à la compression du mortier durci. Cependant, il améliore les propriétés physico-mécaniques ainsi que les propriétés chimiques des ciments aux laitiers. C'est parce qu'il agit comme un activateur pour l'hydratation du ciment au laitier [115].

Benn et al, 2014 [116] ont étudié l'effet de l'addition de filler calcaire, de la poussière de four de ciment, cendres volantes et combinaisons de ces matériaux, sur la résistance à la compression à 28 jours des éprouvettes de mortiers.

Les résultats indiquent que l'ajout jusqu'à 5% de poussière de four au ciment n'a pas nui à la résistance à la compression des mélanges de ciment seulement. Dans les mélanges faites avec 20% et 30% de cendres volantes en remplacement du ciment, l'ajout du filler calcaire et / ou de poussière de four améliore l'activation des cendres volantes, car les résistances à la compression étaient toutes plus élevées à 28 jours.

Al-Harthy et al, 2003 [117] ont ajouté le CKD à des mélanges de béton et de mortier pour étudier son effet sur la résistance et sur la capacité de la zone de transition à absorber de l'eau, le facteur important dans le processus de détérioration. Ils ont constaté que la substitution du ciment avec du CKD ne conduit pas à un gain de résistance pour tous les échantillons étudiés et l'ajout correct de CKD n'a aucun effet négatif sur les propriétés de résistance. Il est également montré que les mortiers préparés en utilisant de quantités appropriées de CKD présentent de meilleures caractéristiques d'absorption. Cependant, au-dessus de certaines limites, l'absorption d'eau du mortier a augmenté avec l'augmentation des teneurs en CKD et par conséquent une diminution des résistances au mortier.

Detweiller et al cités dans [118] ont trouvé que les ciments contenant seuls les CKD ont une consistance réduite, temps de prise et résistance diminuées. La perte de résistance est attribuée aux alcalis dans la poussière. Ils ont annoncé que l'utilisation des cendres volantes avec CKD dilue les alcalis et améliore ainsi les résistances. Les cendres volantes sont principalement composées de fondu d'alumine-silicate (amorphe) et une plus petite quantité de minéraux

crystallins, tels que le quartz, mullite, mica, etc. En raison du haut degré de minéralisation à laquelle le silicate tétraédrique est ponté avec de l'oxygène, la plupart des cendres volantes, en particulier la classe F réagissent très lentement avec de l'eau et de la chaux à température ambiante.

Certaines recherches ont indiqué que si les trois matériaux : ciment Portland, CKD et les cendres volantes sont mélangés de manière appropriée, les alcalis de CKD activent l'hydratation des cendres volantes et les mélanges peuvent créer un matériau avec des caractéristiques cimentaires élevées [119]. L'addition de laitier au mélange du ciment-CKD réduit généralement la maniabilité, mais il augmente la résistance mécanique par rapport aux mélanges ne contenant pas de laitier.

Siddique et al, 2012 [120] ont rapporté que l'utilisation de CKD jusqu'à 10% n'a pas eu d'effets néfastes sur le temps de prise, la stabilité ou sur le retrait final des pâtes au ciment Portland. Cependant, les résultats de résistance ont varié. Ceci est très probablement attribué à la composition de la poussière différente de celle du ciment.

Afin de caractériser l'utilisation structurelle du béton produit dans les applications d'infrastructure civile. **Najim et al, 2016** [121] ont étudié les propriétés rhéologiques et certaines propriétés mécaniques clés et de quelques propriétés dynamiques des bétons haute performance / auto-compactant fabriqués en utilisant la poussière de four de ciment comme matériau de remplacement du ciment dans la composition de base. Différents pourcentages de remplacement massique du ciment sont choisis: 10%, 20% et 30% tout en maintenant constant le contenu des autres constituants.

Les résultats ont montré qu'il y avait une diminution progressive de la fluidité et des propriétés mécaniques avec le remplacement croissant de CKD. Cependant, un béton auto-compactant haute résistance pourrait être produit avec jusqu'à 20% du CKD. Le béton auto-compactant haute performance a été obtenu avec 30%. L'incorporation de CKD a conduit à diminuer le module d'élasticité en parallèle avec l'augmentation de la capacité d'amortissement.

Mehetre et al, 2014 [122] ont mené une étude comparative des propriétés du béton autoplaçant avec le métakaolin et la poussière de four de ciment. Le métakaolin et le CKD ont été utilisés pour remplacer la teneur en ciment de trois pourcentages différents (10, 20 et 30%).

Il a été rapporté que le béton peut contenir jusqu'à 50% de CKD. L'ajout de 10% de métakaolin et de poussière de four de ciment dans les mélanges du béton autoplaçant augmente la capacité d'auto-compactage des bétons étudiés.

La résistance à la compression, la résistance à la flexion et la résistance à la traction du béton auto plaçant augmentent pendant 7 jours à 28 jours de durcissement, avec des niveaux de remplacement de 10%, 20%, 30% de ciment par Metakaolin & CKD. Ces résistances sont maximales pour le taux de 10% de remplacement par rapport à 20% et 30%.

II. 4.7. Influence du filler calcaire sur les propriétés du béton autoplaçant

Les fillers calcaires s'utilisent principalement dans la formulation des bétons autoplaçants pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la substitution d'une partie du ciment par du filler calcaire permet de réduire le coût du mélange puisque le prix des fillers est environ quatre fois moins élevé que celui du ciment. Ensuite, cette substitution permet également de réduire la chaleur d'hydratation, souvent élevée dans les bétons autoplaçants où la quantité de ciment est généralement importante de manière à favoriser l'écoulement. Cette augmentation de chaleur engendre par la suite des retraits induisant des fissures. Enfin, les fillers permettent de combler un éventuel déficit en particules fines dans la courbe granulométrique des mélanges.

Ye et al, 2007 [123] montrent que la poudre de calcaire employée dans la pâte de ciment du BAP ne participe pas à la réaction chimique et elle agit comme un accélérateur au début de l'hydratation du ciment. Cependant, plusieurs auteurs ont remarqué que, pour un dosage constant en ciment (ou un rapport E/C constant), l'ajout du filler calcaire contribue à diminuer la viscosité d'une pâte de ciment (malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides), avant de provoquer une augmentation de la viscosité lorsque son dosage dépasse une certaine valeur critique, qui dépend du rapport E/C.

Yahia et al, 2005 [64] montrent qu'à chaque rapport E/C correspond un dosage optimum en filler calcaire qui peut assurer un écoulement optimal du mélange cimentaire.

El Hilali, 2009 [124] ont remarqué que la finesse des fillers calcaires influe de manière significative sur la quantité d'eau nécessaire pour remplir les vides dans la pâte de ciment. Le même auteur a montré que la viscosité des pâtes autoplaçantes diminue légèrement avec l'augmentation de la finesse des additions calcaires, ce qui implique une réduction du seuil de cisaillement des pâtes de ciments.

Zhu et Gibbset al, 2005 [125] ont étudié l'influence de différents types de filler calcaire sur les propriétés des BAP. Dans le cas des pâtes de ciment, le type de filler utilisé ne semble pas avoir d'influence sur l'étalement. Par contre, si on s'intéresse au béton, ils montrent que le type de filler a une forte incidence sur la quantité de superplastifiant pour un étalement donné. Malgré cela, quel que soit le type de filler utilisé, leurs résultats montrent que plus il y a de filler en remplacement du ciment, moins il faut de superplastifiants pour atteindre un étalement donné.

D'autres études [126] comparent l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires à celle des bétons vibrés. Ces auteurs observent une accélération de la résistance au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours. Ceci est expliqué par une hydratation favorisée par une multiplication des sites de nucléation des fines du filler. Cette résistance augmente d'autant plus que la finesse du filler est importante [127].

II.4.8. Valorisation des fillers issus de concassage des roches calcaires

Peu d'études se sont intéressées aux problèmes des poussières provenant du concassage des roches calcaires et à la possibilité de leur utilisation dans les bétons en tant qu'addition.

En Turkey **Çelik et Marar, 1996** [128] ont étudié l'influence du taux de poussière de concassage sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons, à l'état frais et durci. Le sable a été partiellement remplacé par 5, 10, 15, 20, 25 et 30 % de poussières. Il a été constaté que lorsque le taux de poussières augmente, le volume d'air et l'affaissement diminuent. Les mélanges les plus performants sont ceux qui contiennent 10 % de poussières. Au-delà, les performances mécaniques diminuent progressivement. Les mélanges contenant 5 % de poussières n'ont pas assez de fillers pour augmenter la compacité de la pâte de ciment, et ils présentent une résistance inférieure à ceux obtenus avec 10% d'ajout. Pour les mélanges ayant plus de 10%, les auteurs supposent qu'il n'y a pas assez de pâte de ciment pour enrober les granulats, ce qui entraîne une diminution de la résistance.

Les recherches réalisées sur des mortiers confectionnés avec des sables remplacés partiellement par un pourcentage croissant de poussières de concassages, allant de 0 jusqu'à 20%, ont montré qu'au jeune âge, une amélioration de la résistance à la compression des mortiers contenant les poussières de concassage a été remarquée, bien que la demande en eau et la porosité de ces mélanges soient supérieures. Le gain de résistance au jeune âge est attribué à l'accélération de l'hydratation dû aux effets de l'introduction des poussières de concassage.

À long terme, aucun effet nuisible n'a été observé.

En Belgique, le projet FILLTECH a été initié en 2008 pour étudier la faisabilité de telle voie de valorisation. Six fillers calcaires de caractéristiques physico-chimiques représentatives de ce que l'on trouve dans les sols wallons (région au sud de la Belgique) ont été sélectionnés. Les résultats de cette recherche intégrant des aspects de durabilité à long terme ont montré que, malgré la diminution de la teneur en ciment et l'augmentation du rapport eau/ciment des bétons additionnés de fillers calcaires, les pertes de résistance en compression par rapport au béton sans filler sont négligeables à faibles de substitution. La contamination des fillers par des particules argileuses actives (mise en évidence par un essai d'adsorption du bleu de méthylène) était le paramètre prédominant. L'argile est en effet responsable de la mobilisation d'une partie de l'eau de gâchage nécessaire à l'ouvrabilité du béton [10].

II.5 Conclusion

La recherche bibliographique sur l'effet des ajouts cimentaires nous permet de tirer des conclusions suivantes :

- Les particules minérales peuvent réagir chimiquement avec la matrice cimentaire pour former des produits similaires à ceux résultant de l'hydratation du ciment. Ainsi, les additions de nature siliceuse peuvent présenter une plus ou moins grande activité pouzzolanique alors que les additions calcaires peuvent réagir avec la phase alumineuse du ciment.
- L'addition de calcaire dans le ciment améliore la résistance à la compression aux jeunes âges, car son incorporation dans le ciment permet d'accélérer la vitesse d'hydratation des ciments portland. De même le laitier et la pouzzolane permettent de donner une bonne résistance à long terme.
- La réactivité des laitiers dépend de plusieurs paramètres. Elle est une fonction croissante de la température, elle diminue quand le pourcentage de laitier augmente et augmente en fonction de la quantité d'eau initialement présente dans l'échantillon.
- La poudre de verre finement broyé joue la fois un double rôle pouzzolanique et densification de la matrice cimentaire.
- Le CKD est une poussière de four de ciment, lorsqu'elle est utilisée seule, elle peut

entraîner une diminution de la maniabilité, des temps de prise et de la résistance en raison de la teneur élevée en alcali. Son utilisation avec des cendres volantes ou des laitiers de hauts fourneaux améliore considérablement les performances des ciments élaborés.

➤ L'usage des additions minérales fournit au béton une matrice plus dense qui sera plus résistante aux produits agressifs tels que les sulfates, les chlorures et les autres agents agressifs. La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin gouvernent leurs propriétés cimentaires dans le béton. Leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux.

➤ L'incorporation conjuguée d'adjuvants fluidifiants et d'additions minérales combinées conduit, généralement, à la réduction de la quantité d'eau nécessaire au gâchage et à l'augmentation conséquente de la compacité du matériau. Ainsi, des améliorations très significatives des performances mécaniques, physiques et de durabilité des bétons peuvent être obtenues caractérisant une catégorie spécifique de matériaux que l'on appelle les bétons à hautes et à très hautes performances.

➤ L'efficacité de la dispersion des particules par les adjuvants fluidifiants dépend de la nature et de la quantité relative ciment - addition minérale employée dans la formulation.

➤ Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des contributeurs positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leur élément.

Chapitre III

Matériaux, méthodes expérimentales et techniques d'analyse

Chapitre III : Matériaux, méthodes expérimentales et techniques d'analyse

III.1. Introduction

L'objectif de notre investigation est d'évaluer expérimentalement les performances des bétons élaborés à base de ciment portland, des polyadditions et un superplastifiant haut réducteur d'eau.

La connaissance des divers propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques des matériaux, est une exigence primordiale afin de pouvoir procéder au dosage correct des différents composants d'une matrice cimentaire d'une part, et d'expliquer les tendances observées dans les résultats, d'autre part.

À cet effet, nous essayons dans ce chapitre de définir la composition et la provenance des matériaux utilisés pour la réalisation de ce travail. Nous précisons également le programme expérimental, les différentes méthodes d'essais utilisés pour confectionner nos mélanges, pâtes, mortiers et bétons ainsi que les différents essais expérimentaux pour les caractériser à l'état frais et à l'état durci. Enfin, nous listons les différents mélanges étudiés.

III.2. Identification et caractérisation des matériaux de base utilisés

L'ensemble des essais de caractérisation permet de s'assurer de la conformité des matériaux utilisés ainsi que les mélanges confectionnés.

III.2.1. Ciment (C)

Le ciment utilisé est un ciment CEM I 42.5 N provenant de la cimenterie de Oum El kalil / Tunisie.

La composition chimique, minéralogique et les caractéristiques physiques du ciment, sont illustrées aux tableaux III.1, III.2 et III.3.

Tableau III.1 : Composition chimique du ciment Portland.

Elément	Teneur en %
SiO₂	20.52
AlO₂	5.85
Fe₂O₃	2.97
CaO	62.7
MgO	1.15
SO₃	1.91
K₂O	0.43
Na₂O	0.13
Cl⁻	0.01
P.A.F	3.8
CaO Libre	0.62
RI	0.529

L'utilisation de ces données a permis de déterminer le pourcentage théorique des principaux constituants du ciment par application des formules de Bogue. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le Tableau III.2. On notera que les teneurs en C₂S et C₃A sont particulièrement moyens.

Tableau III.2 : Composition minéralogique du ciment Portland

élément	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF
%	50.5	16.6	10.4	9.03
Norme	35-65	10-40	0-15	5-15

Quant aux caractéristiques physiques illustrées sur le tableau III.3, on constate que les résultats d'analyse du ciment sont conformes aux exigences de la norme NF EN 197-1 en ce qui concerne le temps de prise.

Tableau III.3 : Caractéristiques physique du ciment Portland

Temps de prise (min)	Début	123
	Fin	186
Masse volumique absolue (g/cm³)		3.076
Masse volumique apparente (g/cm³)		1.098
Finesse de Blaine (cm²/g)		3100

Les caractéristiques mécaniques du ciment sont mesurées sur des mortiers normalisés selon la norme NF EN 196-1. Les différentes valeurs de résistances à la compression et à la traction par flexion trouvées expérimentalement sont représentées sur le Tableau III.4.

Tableau III.4 : Résistances mécaniques du ciment

	Age (jours)		
	2 j	7 j	28 j
Compression (MPa)	19.91	36,40	48.81
Traction par flexion (MPa)	3,85	6,3	7.79

Les résultats des essais montrent que le ciment est conforme aux exigences de sa classe.

III.2.2. Les additions minérales

Cinq ajouts minéraux différents ont été utilisés dans cette étude : le filler calcaire, le laitier granulé de hauts fourneaux, la pouzzolane naturelle dans la première partie de l'étude. Cependant la poudre de verre et la poussière de four de ciment dans la deuxième partie.

III.2.2.1. Filler calcaire (FC)

Les fillers calcaires utilisés sont référencée FC. Il s'agit d'une poudre, obtenue lors de concassage des roches calcaires pour la production des granulats pour béton au niveau de la carrière géante de Ben Azouz (Skikda, Est Algérie). C'est un matériau sec composé essentiellement de 99.04% de CaCO₃ en poids. (Ils ont été tamisés et conservés dans des sacs hermétiquement fermés jusqu'au moment de leur utilisation (Photo III.1).



Photo III.1 : Le filler calcaire

Le tableau III.5 résume les résultats des analyses physiques et chimiques de ces fillers.

Tableau III.5 : Composition chimique du filler calcaire.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF
Teneur en %	0.57	0.30	0.16	55.70	0.37	0.01	0.03	0.07	42.67

Selon les analyses chimiques, le filler calcaire a une teneur élevée en oxyde de calcium et des faibles pourcentages en aluminium, silice, ferrite, soufre, magnésium et sodium.

Les caractéristiques physiques du filler calcaire sont illustrées dans le tableau III.6.

Tableau III.6 : Caractéristiques physique du filler calcaire

Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.700
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.032
Finesse de Blaine (cm ² /g)	3300
Valeur du bleu méthylène (g/Kg)	0.85

On constate que le filler calcaire présente une masse volumique inférieure à celle du ciment. Cependant leurs surfaces spécifiques sont comparables.

L'indice d'activité : C'est une caractéristique importante. Elle est calculée en faisant le rapport entre les résistances à la compression à 28 jours du mortier sans calcaire (R) et celle du mortier contenant 25% de calcaire (FC₂₅) en substitution par le biais de la formule

suivante : $I = R_{c28} R / R_{c28} FC_{25}$ d'où $I = 0.65$.

III.2.2.2. Laitier granulé (LG)

Le laitier granulé utilisé (Photo III.2) est un sous-produit de la fabrication de la fonte au complexe sidérurgique d'El-hadjar (Annaba, Est Algérie), de structure vitreuse. Il a la forme d'un sable de granulométrie 0/3 de couleur claire. Il a été réduit en poudre à l'aide d'un broyeur conventionnel à boulets, puis tamisé jusqu'à obtenir une surface spécifique comparable à celle du ciment. Le tableau III.7 donne sa composition chimique.



Photo III.2 : le laitier de hauts fourneaux

Tableau III.7: Composition chimique du laitier granulé de haut fourneau.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Teneur en %	36.72	7.79	0.26	42.13	4.56	0.36	0.48	0.31

Les valeurs portées sur le tableau III.7 relatives à sa composition chimique, indique des teneurs importantes de silice et de chaux et un faible teneur en alumine. 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. Leur hydraulité augmente aussi avec la teneur en MgO pour un dosage strictement inférieur à 15 %.

La qualité du laitier est appréciée par deux modules. Le tableau III.8 montre le module de basicité (Mb) et le module d'activité (Ma) du laitier.

Tableau III.8 : Module de basicité (Mb) et Module d'activité (Ma).

Module	Formule	Valeur	Commentaire
Module de basicité (Mb)	$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$	1.05 < 1.3	Le laitier est à basicité modérée
Module d'activité (Ma)	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	0.21	0,17 < 0.21 < 0,25 Le laitier est basique

En comparant la composition chimique du laitier de hauts fourneaux avec celle du filler calcaire, on trouve que le laitier est moins riche en CaO et plus riche en SiO₂, Al₂O₃ et MgO que le filler calcaire.

Tableau III.9 : Caractéristiques physique du laitier granulé de haut fourneau.

Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.830
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.216
Finesse de Blaine (cm ² /g)	3200

On observe sur le tableau III.9 que le laitier granulé de haut fourneau présente une masse volumique inférieure à celle du ciment. Cependant leurs surfaces spécifiques sont comparables.

III.2.2.3. Pouzzolane naturelle (PN)

La pouzzolane naturelle (Photo III.3) est extraite du gisement de Bouhamidi de Béni-Saf de la région ouest d'Algérie. Toute la pouzzolane utilisée comme substituant au ciment est réduite en poudre à l'aide d'un broyeur conventionnel à boulets.

**Photo III.3 : La pouzzolane naturelle**

Les analyses chimiques et physiques sont reportées aux tableaux III.10 et III.11.

Tableau III.10: Composition chimique de la pouzzolane naturelle

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Mg
Teneur en	54.5	14.65	6.46	12.4	1.48

Les valeurs portées sur le tableau III.10 indiquent une teneur importante en silice. La norme ASTM C618-94 exige une somme SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ supérieure à 70% pour une bonne pouzzolanité. La somme pour le matériau utilisé est de 75.65 %. Donc il présente une composition chimique satisfaisante et par conséquent, il est susceptible de produire une bonne réactivité pouzzolanique.

Les caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau III.11: Caractéristiques physique de la pouzzolane naturelle

Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.900
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.99
Finesse de Blaine (cm ² /g)	5000

De même que pour que le laitier granulé de haut fourneau et le filler calcaire, la pouzzolane naturelle présente une masse volumique inférieure à celle du ciment. Par contre la surface spécifique est plus importante.

III.2.2.4. La poudre de verre (PV)

Il s'agit des déchets de verre, des verres de vitrage brisés, des bouteilles rejetées triées et sèches à 100 °C au laboratoire pour lui éliminer les impuretés, puis broyé à une finesse de 5300 cm²/g au moyen d'un petit broyeur à boulets de capacité de 10 kg pendant 6 h (Photo III.4).

**Photo III.4 : La poudre de verre**

Le tableau III.12 présente la composition chimique de la poudre de verre.

Tableau III.12 : Composition chimique de la poudre de verre.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻
Teneur en	58.15	0.45	0.14	9.09	2.98	0.06	0.26	15,76	--

Pour avoir une bonne pouzzolanicité, la somme de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ doit être supérieur à 70%. La somme pour l'échantillon étudié est de 58.6 %.

L'indice d'activité de la poudre de verre est de l'ordre de 0.93 (Rc28 (0% verre) = 45,81 MPa et Rc28 (25% verre) = 44,58).

Donc, le verre utilisé présent une composition chimique non satisfaisante. Cependant, il est très réactif.

Tableau III.13: Caractéristiques physique de la poudre de verre.

Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,46
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0,847
Finesse de Blaine (cm ² /g)	5835

III.2.2.5. La poussière de four de cimenterie (CKD)

La poussière de four de ciment (CKD) (Photo III.5) est récupérée par les filtres électrostatiques du four de ciment de cimenterie de Hadjar Essoud à Skikda. Le broyage du matériau a été effectué à l'aide d'un broyeur de capacité de 10 kg pendant 8 heures puis tamisé (un tamis (80μ). Le broyage été mené à l'université Badji Mokhtar (Annaba).



Photo III.5 : La poussière de four de ciment.

L'analyse chimique de ses principaux composants examinés par rayons X est représentée dans le tableau III.14.

Tableau III.14 : Composition chimique de la poussière de four de ciment.

Élément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P.F	CaO Libre
Teneur (%)	20,19	5,23	3,69	67,54	1,10	0,28	0,48	0,20	0,30	5,50

Nous constatons que les composés constitués essentiellement de CKD sont l'oxyde de calcium (CaO), le dioxyde de silicium (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃), l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et l'oxyde de magnésium (MgO).

Les caractéristiques physiques sont illustrées au tableau III.15

Tableau III.15: Caractéristiques physique de la poussière de four.

Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.073
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.13
Finesse de Blaine (cm ² /g)	3277

III.2.3. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour l'ensemble des essais est l'eau potable. Les résultats de l'analyse chimique de l'eau utilisée se présente dans le tableau III.16.

Tableau III.16 : Analyse chimique de l'eau (mg/l).

Composition	MES	Ca ⁺²	Mg ⁺²	C ⁻¹	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	PH
résultats	912	-	-	60.35	54.08	-	7.34 à T = 13.2°

III.2.4. Adjuvant

Pour la confection des bétons superplastifié et des bétons autoplaçants, nous avons utilisés le POLYFLOW SR 7200 (Photo III.6). C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent

de nouvelle génération non chloré à base de carboxylates. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans des bétons plastiques à auto plaçants transportés sur de longues distances et pompés. La plage d'utilisation recommandée est fixée par la fiche technique de 0,2 à 3% du poids du ciment. Les caractéristiques physicochimiques de cet adjuvant données par le fabricant sont indiquées dans le tableau III.17.

Pour plus d'indications sur ce produit, la fiche technique est présentée en annexe.



Photo III.6 : Le superplastifiant utilisé.

Tableau III.17 : Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant.

Aspect	Couleur	Masse volumique	PH	Teneur en chlorures	Extrait sec
Liquide	Brun	$1.05 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$	5.5 ± 6	<0.1%	$22 \pm 1\%$

III.2.5. Granulats

III.2.5.1. Sable normalisé

Pour la confection des mortiers normalisés, nous avons utilisé est un sable normalisé provenant de l'importation (France) de granulométrie comprise entre 0.08 et 3 mm. C'est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité. Il est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun $1\ 350 \pm 5 \text{ g}$.

- ✓ **Analyse granulométrique:** La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences de la norme EN 196-1.

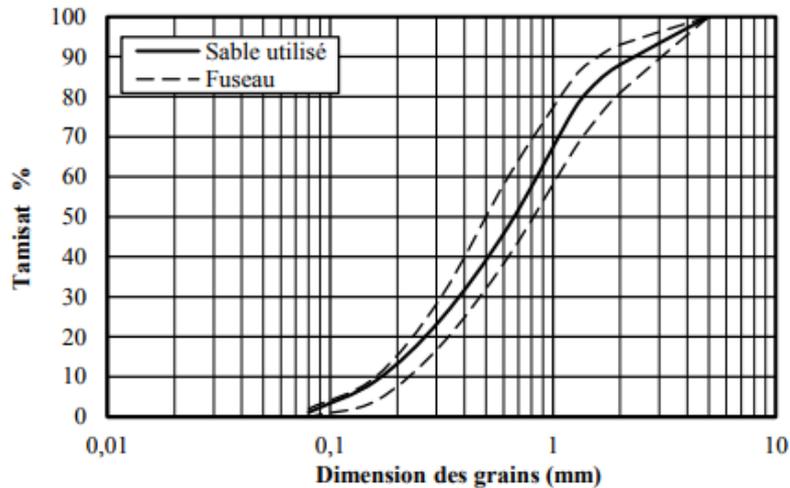


Figure III.1 : Courbe granulométrique du sable normalisé utilisée.

✓ Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques du sable normalisé sont données dans le tableau III.18.

Tableau III.18: Caractéristiques physiques du sable normalisé.

Mv absolue (g/cm^3)	Mv apparente (g/cm^3)	Module de finesse	Équivalent de sable (%)
2,5	1.63	1,94	97

III.2.5.1. Graviers et sables

La composition des bétons a été effectuée à base de cinq classes granulaires connus sous les appellations commerciales suivantes : Sable 0/4, Sable 0/1, Gravillon 3/8, 8/15 et Gravier 15/25.

Les deux gravillons et le gravier proviennent de la carrière ENG « Entreprise Nationale des Granulats, unité Oum Settass » sis à 8 km au sud-est d'El Khroub et à 12 km de Constantine.

Le sable 0/1 utilisé est un sable naturel de dune de la région de Oued Zhor dans la wilaya de Skikda, alors que le sable 0/4 est sable concassé de même nature et provenance des graviers.

a/ Granularité

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.

Les résultats de l'essai effectué pour les granulats utilisés sont représentés dans la figure III.2.

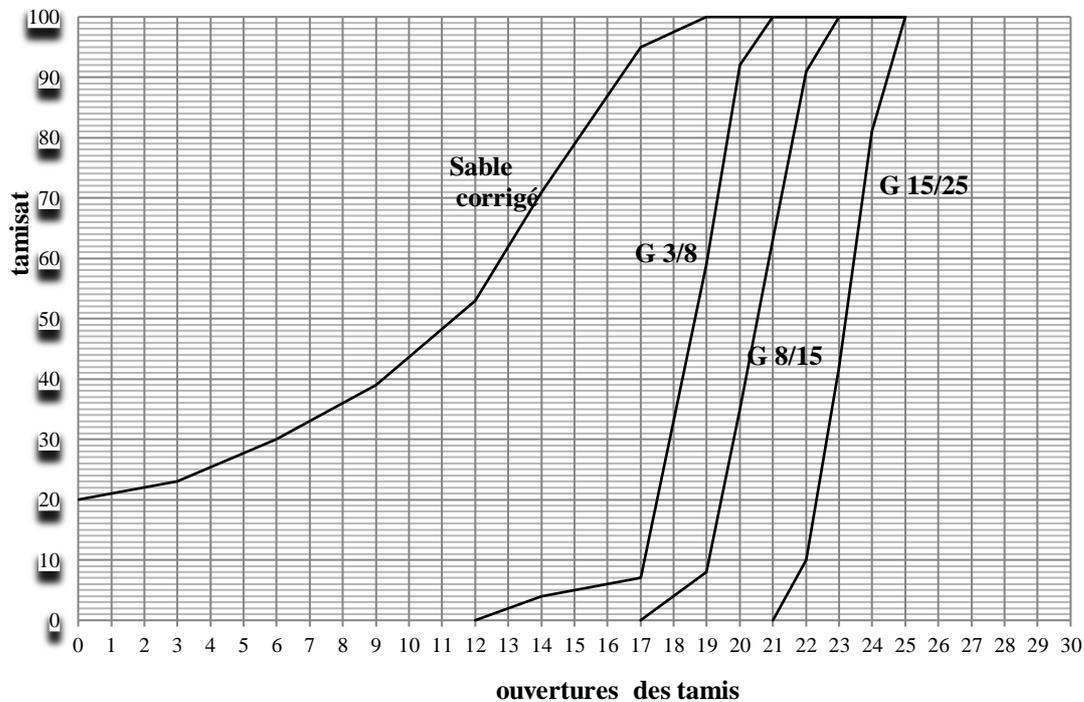


Figure III.2. : Courbe granulométrique du sable et gravier.

L'analyse granulométrique par tamisage représentée à la figure III.2 révèle que la répartition des gravillons est serrée. Elle est, par contre, plus étalée pour le sable corrigé.

b/ Propriétés physiques et mécaniques

Les propriétés usuelles des granulats ont été mesurées selon les normes européennes. Elles comprennent :

- La masse volumique absolue, notée MVA, est égale à la masse de l'unité de volume absolu du granulat constitué uniquement par le volume de la matière sans tenir compte du volume de toute forme de vides. Elle est déterminée au pycnomètre selon les spécifications de la norme [NF P 18-555].
- Le coefficient d'absorption d'eau A_b des granulats est défini par le rapport entre l'augmentation de masse de l'échantillon, provoquée après 24 heures d'immersion dans l'eau, et la masse de matériau sec. De même, cet essai est réalisé selon les normes spécifiques aux gravillons [XP P 18-554]

- L'équivalent du sable ES qui permet d'apprécier la propreté du matériau. Il a été mesuré selon la norme [NF P 18-598].
- Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm [EN 12620].
- L'essai au bleu de méthylène du sable MB réalisé selon la norme [NF P 18-592]. Le principe de cet essai est de déterminer la capacité d'adsorption des fines actives par fixation du bleu de méthylène.
- La caractérisation des granulats vis-à-vis la fragmentation au choc a été déterminée selon la norme [NF P18-573] afin de s'assurer de la dureté des matériaux.
- la détermination de la résistance à l'usure des graviers a été par déterminé au moyen de l'essai micro-Deval selon la norme [EN 1097-1].

Tableau III.19 : Caractéristiques physiques des granulats utilisés.

Essai		S 0/1	S 0/4	G 3/8	G 8/15	G 15/25
Masse volumique Absolue	(g/cm ³)	2.56	2.58	2.60	2.63	2.65
Absorption (Abs)	%	0.29	2	2	1	1.33
Equivalent de sable (ES)	-	70	65		-	-
Module de finesse (MF)		1.9	2.84	-	-	-
Teneur en fines	%	2.01	12,66	2.62	2	5.36
Bleu de méthylène	g/kg	0.8	0.9	1.66		
Micro-Deval (MDE)	-	-	-	-	16.4	-
Los-Angeles (LA)	-	-	-	-	23.16	-

On remarque d'après le tableau III.19 que :

- Les masses volumiques absolues sont presque égales entre elles. La valeur la plus élevée est celle du gravier 15/25, tandis que la plus faible est celle du la plus petite coupure (sable 0/1).

- Le coefficient d'absorption d'eau est très faible pour des granulats calcaires, ce qui indique une faible porosité intragranulaire de ce matériau. Les valeurs sont conformes aux spécifications de la norme [XP P 18-545], qui préconise une absorption d'eau maximale de 5 % pour les granulats à bétons. Les quantités d'eau absorbées par les granulats seront prises en compte dans les formules de béton de manière à maîtriser l'eau efficace.
- Les valeurs de l'équivalent de sable des deux sables respectent les spécifications des sables à bétons de la norme [NF P 18-598], qui doit être supérieure à 60 pour les sables concassés à usage dans des bétons de qualité courante.
- La valeur de bleu méthylène du sable est admissible selon la limite exigée par la norme [NF P 18-592] et qui est de 1,0 g de bleu pour 100 g de fines.
- Le module de finesse du sable corrigé utilisé est 2,30 ce qui est acceptable pour la confection des bétons. La correction du sable nous s'avère indispensable car le sable de carrière 0/4 présente un module de finesse élevé (2.84). Pour ce faire on a utilisé la méthode d'Abrams.

Le module de finesse désiré $M_{fx} = 2,30$

$$S1 = \frac{M_{fx} - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}} \times 100; \quad S1 = \frac{2,3 - 1,9}{2,84 - 1,9} = 42\%$$

$$S2 = \frac{M_{f1} - M_{fx}}{M_{f1} - M_{f2}} \times 100; \quad S2 = \frac{2,84 - 2,3}{2,84 - 1,9} = 58\%$$

- La résistance au choc Los Angeles (LA) des granulats, mesurée selon la norme [NF P18-573] sur la classe 6,3/10 extraite du gravillon G15/25 est égale à 23.16. Cette valeur est inférieure à la valeur spécifiée par la norme [NF P18-540], qui préconise une valeur limite supérieure (Vss) de 40 pour les granulats destinés à la confection de bétons courants.
- La résistance à l'usure obtenue est conforme à la spécification de la norme.

d/ Les analyses chimiques des granulats

Outre les propriétés physiques et mécaniques des granulats, diverses caractéristiques

chimiques sont à considérés en vue de l'utilisation d'un granulats dans le béton. Les caractéristiques chimiques des granulats utilisés sont représentées dans le tableau III.20.

Tableau III.20: Analyse chimique des granulats

Désignations (%)	SO ₃	SO ₄	CL ⁻	CaCO ₃	SiO ₂
S 0/1	Traces	Traces	0,17	1,80	95,21
S 0/4	Traces	-	0.24	82.40	/

L'analyse chimique du sable S 0/4 a montré que le constituant prédominant est l'oxyde de calcium CaO avec une concentration massique de 82,40 %. Compte tenu de cette analyse chimique, le sable 0/1 peu être qualifiée de sable siliceux.

Cette analyse a montré aussi que les granulats de l'étude ne contiennent pas de matières nuisibles à la fabrication des bétons hydrauliques.

III.3. Méthodologie d'étude

L'étude expérimentale a été réalisée au niveau du laboratoire l'habitat et de la construction de la Wilaya de Skikda et au laboratoire de la cimenterie de Hadjar essoud.

Pour des raisons d'économie et pour atteindre les objectifs fixés, l'étude a été entreprise en un ensemble de deux sous plans :

- Un premier sous-plan vise à comprendre mieux l'effet de l'interaction ciment- filler calcaire et/ou laitier granulé de hauts fourneaux et pouzzolane naturelle-adjutant à base de polycarboxylate sur le comportement physique et mécanique des bétons ordinaires et superplastifiés.
- Le deuxième sous-plan doit nous permettre d'étudier le comportement à l'état frais et durci d'un béton autoplaçant formulé initialement avec une addition filler calcaire. Ensuite, une substitution volumique partielle de ce filler est opérée. On additionne la poudre de verre ou la poussière de four de ciment successivement.

III.3. 1. Sous plan 1

Ce premier plan comporte deux étapes :

- **Étape 1**

Identifier la proportion maximale du filler calcaire seul qu'on peut introduire sans compromettre la qualité des bétons confectionnés. Pour atteindre cet objectif nous avons en premier lieu caractérisé les liants confectionnés en introduisant le filler calcaire avec des pourcentages différents (5,10, 15, 20 et 25) en substitution massive partielle du ciment portland dans la composition des pâtes et des mortiers normalisés. Le choix de la composition optimale du ciment avec le filler calcaire est en fonction des critères physico-mécaniques.

- **Étape 2**

Ensuite pour pouvoir utiliser dans les bétons, une quantité de filler de calcaire nettement supérieure à celle trouvée, Nous procédons à une substitution massive simultanée du ciment par le filler calcaire et/ ou la pouzzolane naturelle et de laitier granulé des hauts fourneaux. L'idée de substitution optée pour cette partie est de remplacer dans le béton contenant 20% de FC une quantité de 5% et 10% respectivement de calcaire par le laitier granulé ou la pouzzolane naturelle respectivement. Puis, une masse de 10% de fillers de calcaire est substituée par 5% de LG et 5% de PN dans le même mélange. Et comme il est difficile de comprendre les phénomènes mis en jeu, cette investigation consiste à étudier le rôle du filler calcaire combinée au laitier granulé et/ou pouzzolane naturelle en deux étapes : étude des liants et puis sur des bétons courants à un rapport $E/C = 0.55$ et des bétons superplastifiés à une dose de 0.5% de la masse du liant tout en maintenant le rapport E/C constant.

III.3. 2. Sous plan 2

Dans le but de mener une étude comparative de l'effet du dosage et de la nature des additions minérales sur les propriétés des bétons autoplacants à l'état frais et à l'état durci. Un BAP de référence contenant du ciment et du filler calcaire a été formulé. Les compositions des BAP d'étude sont obtenues par substitution volumique du filler calcaire contenu dans la composition initiale par la poussière du four de ciment ou la poudre de verre avec des taux égal 3.75 %, 7.5% et 11.25 % respectivement. Sachant que le rapport initial $FC/C+FC= 15\%$.

Le tableau III.21 résume les paramètres ainsi les essais effectués pour chaque compagne d'essais.

Tableau III.21: Les paramètres et les essais effectués.

a/ Sous plan 1					
Programme expérimental		Paramètres		Essais effectués	Nbre mélanges
		Variable	Constante		
1 ^{ère} compagne	Pates	Taux du filler calcaire seul 0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 25%	Consistance	- Besoin en eau - Temps de prise - Stabilité	6
	Mortier normalisé		Sable normalisé, E/C, CEMI.	- Résistances mécaniques à 2 j, 7j et 28 j	6
2 ^{ème} compagne	Pates	Taux du filler calcaire ou/et la pouzzolane naturelle, le laitier granulé	consistance	- Besoin en eau - Temps de prise - Stabilité	5
	Mortier normalisé		Sable normalisé, E/C, CEMI.	- Résistance à la compression à 7j et 28 j	5
3 ^{ème} compagne	Bétons à rapport E/C = 0.55	Taux du filler calcaire seul ; taux du filler calcaire ou/et la pouzzolane naturelle, laitier granulé.	CEM I , E/C, sable, graviers.	- Masse volumique - Ouvrabilité - Air occlus	9
				- Résistances à la compression à 7j et 28 j	
4 ^{ème} compagne	Bétons à rapport E/C = 0.55 + superplastifiant	Taux du filler calcaire seul ; taux du filler calcaire ou/et la pouzzolane naturelle, laitier granulé	CEM I , E/C, sable, graviers et dosage superplastifiant	- Masse volumique - Ouvrabilité - Air occlus	9
				- Résistances à la compression à 7j et 28j.	

b/ Sous plan 2					
Programme expérimental		Paramètres		Essais effectués	Nbre mélanges
		Variable	Constante		
5 ^{ème} compagne	Betons auto-plaçants	Taux du filler calcaire, poudre de verre et poussière de four de ciment	CEM I , E/C, sable, graviers et dosage superplastifiant	-Etalement -La boîte en L - Essai au tamis Resistances mécaniques à 1j, 7j et 28 j	7

III.4. Proportions des constituants des mélanges

III.4. 1. Sous plan 1

Tableau III.22 : Proportion des constituants des mélanges aux filler calcaire, pouzzolane naturelle et laitier granulé.

Désignation		C (%)	FC(%)	LG(%)	PN(%)
Témoin	T	100	--	--	--
Ciment+ Calcaire seul	FC ₅	95	5	--	--
	FC ₁₀	90	10		
	FC ₁₅	85	15	--	--
	FC ₂₀	80	20	--	--
	FC ₂₅	75	25		
Ciment+ calcaire + laitier granulé	FC ₁₅ LG ₅	80	15	5	--
	FC ₁₀ LG ₁₀	80	10	10	--
Ciment+ calcaire + pouzzolane naturelle	FC ₁₅ PN ₅	80	15	5	--
	FC ₁₀ PN ₁₀	80	10	10	--
Ciment+ calcaire + laitier granulé+ pouzzolane naturelle	FC ₁₀ LG ₅ PN ₅	80	10	5	5

III.4. 1. Sous plan 2

Tableau III.23 : Proportion des constituants des mélanges aux filler calcaire, poudre de verre et poussière de four de cimenterie

Désignation		C (%)	FC/ C+FC(%)	CKD/ C+CKD(%)	PV/ C+PV(%)
Témoin	BAP 1	100	15	--	--
Ciment + calcaire + poudre de verre	BAP 2	100	11.25	3.75	--
	BAP 3	100	7.5	7.5	--
	BAP 4	100	3.75	11.25	--
Ciment + calcaire + CKD	BAP 5	100	11.25	--	3.75
	BAP 6	100	7.5	--	7.5
	BAP 7	100	3.75	--	11.25

III.5. Méthodes de formulation adoptées

III.5. 1.Méthode de formulation des bétons ordinaires

Nous avons opté pour la méthode la plus pratiquée en Algérie à savoir celle de Dreux-Gorisses.

III.5.1.1. Les étapes de formulation

Voir Annexe A

III.5.1.2.Formulation du béton ordinaire témoin

Le béton témoin étudié est un béton dont les caractéristiques sont les suivants :

Tableau III.24 : Caractéristiques du béton témoin

Données de base	Description (valeur)
Béton normal de classe	C35/45.
Consistance	béton plastique.
Dimension maximale de	25 mm
Forme des granulats	Granulats concassés.
Qualité des granulats	Bonne (courante).
Serrage	vibration normale (courante).
Dosage en ciment	C = 350 kg/m ³
Classe vraie du ciment σ'_c	48.81MPa
Coefficient granulaire G	0,5
E/C	0.55

III.5.2.Méthode de formulation des bétons superplastifiés

Pour les mélanges à superplastifiant, la même méthode décrite pour les bétons ordinaires a été optée. La seule différence est que le pourcentage de l'adjuvant introduit dans les mélanges a été fixé à 0.5% de la dose du liant (ciment et additions) tout en maintenant le rapport E/L constant.

III.5.3.Méthode de formulation des bétons autoplaçants

III.5.3.1. L'approche de formulation

L'approche de formulation qui a été utilisée est empirique, basée sur une méthodologie expérimentale s'appuyant uniquement sur des critères recommandés par l'AFGC [08]. Ces critères se résument au :

- Un rapport G/S proche de 1
- Un rapport E/L égale à 0,37
- Un dosage en ciment plutôt élevé (le dosage minimal du ciment est 330 kg/m³)
- Un pourcentage déterminé en ajouts
- $330 \text{ l/m}^3 \leq \text{volume de pate} \leq 400 \text{ l/m}^3$

III.5.3.2. Application

$$\frac{E}{L} = 0,37 ; L = C+F$$

$$\frac{F}{C+F} = 15 \% = 0,15$$

Si on fixe $C = 415$ kg

Donc $F = 73,5$ kg ; et $E = 180,75$ litres

Pour avoir 1000 litre de constituants dans 1 m^3 , on pose le volume pate égal 370 litres.

$$V_{\text{pate}} = V_C + V_F + V_{\text{air}} + V_{\text{eau}} + V_{\text{adj}}$$

$$V_C = \frac{415}{3,1} = 133,90 \text{ litres}$$

$$V_F = \frac{73,5}{2,70} = 27,20 \text{ litres}$$

$$V_{\text{eau}} = 180 \text{ litres}$$

$$V_{\text{air}} = 2 \% = 20 \text{ litres}$$

$$\text{Donc : } V_{\text{adj}} = 370 - (133,90 + 27,20 + 180,75 + 20) = 8,75 \text{ litres}$$

$$V_G = (1000 - 370) = 630 \text{ litres}$$

$$\text{Si } \frac{G}{S} = 0,9 \text{ et } G + S = 630 \text{ litres}$$

$$V_S = \frac{630}{1,9} = 331,57 \text{ litres}$$

$$V_G = 630 - 331,75 = 298,43 \text{ litres}$$

Vérification

$$V = V_C + V_F + V_{\text{air}} + V_E + V_{\text{adj}} + V_S + V_{G1} + V_{G2}$$

$$V = 133,90 + 27,20 + 20 + 180,75 + 8,75 + 331,57 + 298,42 = 999,95 \text{ l} \approx 1000 \text{ l.}$$

Les masses des constituants des BAPs confectionnés sont représentées dans le tableau III.33.

III.6. Fabrication et cure

Pour la confection et le cure des mélanges, plusieurs équipements et fournitures courants ont été utilisés.

III.6.1. Confection des pâtes

Les pâtes de ciment sont préparées dans un malaxeur normalisé EN 196-1 en suivant le mode opératoire indiqué par la norme EN 196-3 relatives à la consistance normale des pâtes pures.

On pèse 500 ± 1 g de ciment et une quantité d'eau, par exemple 125 g. La procédure opératoire de l'essai est la suivante :

Peser 500 grammes de ciment, prendre un volume d'eau distillée à l'aide d'une éprouvette et l'introduire dans la cuve du malaxeur, puis ajouter soigneusement le ciment à l'eau pour éviter toute perte d'eau ou de ciment. Mettre le malaxeur en marche immédiatement à vitesse lente pendant 90 secondes. Arrêter le malaxeur pendant 15 secondes durant lesquelles toute la pâte adhérant à la cuve du malaxeur doit être grattée et remise dans la gâchée. Remettre alors la machine en route à vitesse lente pour une nouvelle durée de 90 secondes, le temps total de fonctionnement est de 3 minutes.



Photo III.7 : Malaxeur automatique

III.6.2. Confection des mortiers

Les procédures suivies pour la préparation des mortiers, la confection, des éprouvettes, de stockage ont été réalisées conformément à la norme EN 196-1. La préparation du mortier a été réalisée en utilisant un malaxeur d'une capacité de 5 litres composé d'un récipient et d'un batteur en acier inoxydable, pouvant fonctionner à une vitesse lente de 140 tours par minute et une vitesse rapide de 285 tours par minute. L'eau et le ciment avec ou sans additions sont introduits dans le récipient à l'arrêt, puis le malaxeur est mis en marche à vitesse lente pendant 60 secondes, puis à vitesse rapide pendant 30 secondes ; le sable étant introduit les premières 30 secondes. Pendant l'arrêt du malaxeur pendant 90 secondes, un raclage manuel des parois du récipient est effectué pendant les premières 15 secondes d'arrêt, puis le

malaxeur est remis en marche à vitesse rapide pendant 60 secondes. Les échantillons d'essai ont été confectionnés selon la norme EN 196-1 dans des moules prismatiques (40*40*160) mm³ et compactés mécaniquement à l'aide d'une table à choc. Une fois arasés, les moules contenant les échantillons sont couverts de film plastique et stockés dans l'environnement de laboratoire de 20°±1°C et une humidité relative d'environ 55±5%.



Photo III.8 : Mortiers confectionnés

III.6.3. Confection des bétons

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est à axe vertical et il a une capacité de 60 litres. Les bétons ont été réalisés conformément à la norme NF P 18-404. Les constituants du béton sont introduits dans la cuve du malaxeur dans l'ordre suivant : gros éléments, liant et sable ; l'eau étant rajouté avec éventuellement l'adjuvant superplastifiant après 01 minute de malaxage à sec. Le malaxage de l'ensemble est poursuivi pendant 02 minutes pour les bétons ordinaire et 4 minutes pour les bétons superplastifiés et les bétons autoplaçants.

Les bétons vibrés ont été mis en place par vibration à l'aide des dispositifs vibratoires traditionnels (principalement aiguille vibrante et table vibrante). Les bétons autoplaçants n'ont subi aucune vibration, ni autre méthode de compaction.

Le béton est ensuite coulé dans des moules cylindriques 16×32 cm soigneusement remplis, vibrés et arasés, et nettoyés avant d'être pesés. Ils sont laissés pendant 24 heures dans la salle de fabrication, à une température de 20±2 C°, sous protection d'un film plastique souple. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulés et conservés dans l'eau jusqu'au jour d'essai.



Photo III.9 : Le malaxeur utilisé

III.7. Caractérisation des mélanges

III.7.1. Des pâtes

III.7.1.1. La consistance

La consistance de la pâte de ciment est sa plus ou moins grande fluidité. C'est une caractéristique qui évolue au cours du temps. Cet essai est effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme EN 196-3.

Les principales étapes de malaxage sont les suivantes :

- Introduire immédiatement la pâte dans le moule préalablement placé sur un support en verre légèrement graissé, et le remplir sans tassement ni vibration excessive.
- Enlever l'excès par un mouvement de va et viens, effectuer avec un outil présentant un bord droit de façon à avoir la face supérieure de la pâte lisse.
- Régler l'appareil préalablement muni de la sonde.
- Placer le moule et la plaque de base sur l'axe de la sonde de l'appareil de Vicat.
- Abaisser la sonde avec précaution jusqu'au contact de la pâte, observer une pause de 1 à 2 secondes, et libérer alors les parties mobiles de la sonde (la sonde doit pénétrer verticalement au centre de la pâte). La libération de la sonde doit avoir lieu 4 minutes après l'instant zéro.

- Effectuer la lecture de l'échelle à la fin de pénétration ou 30 secondes après la libération, la lecture doit être acceptée si elle est de 4 ± 1 millimètre du bord inférieur de la surface de la pâte.

III.7.1.2. Temps de la prise

Il est nécessaire de connaître les début et fin de prise des pâtes de ciment (hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat conformément à la norme EN 196-3 donne deux repérés pratiques.

➤ Temps de début de prise

Le temps de prise de ciment est mesuré par l'appareil Vicat (Aiguille normalisée). Le bout de la prise de ciment est atteint, lorsque l'aiguille ne pénètre plus dans la pâte de ciment. Le début de prise d'un ciment se distingue par une augmentation de viscosité de la pâte.

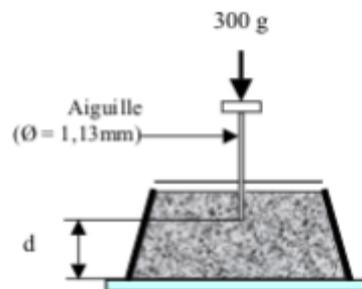


Figure III.3 : Détermination du temps de début de prise.

Le début de prise correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment. ». Ce temps est estimé à 5 min près.

➤ Temps de fin de prise

Le temps de fin de prise se diffère selon le type de ciment, il est calculé depuis le temps zéro jusqu'au moment où l'aiguille commence à ne pas pénétrer qu'à 0,5 mm dans l'éprouvette. Il est mesuré à 15 min près. Pour arriver à ce point, il faut recommencer la pénétration plusieurs

fois.

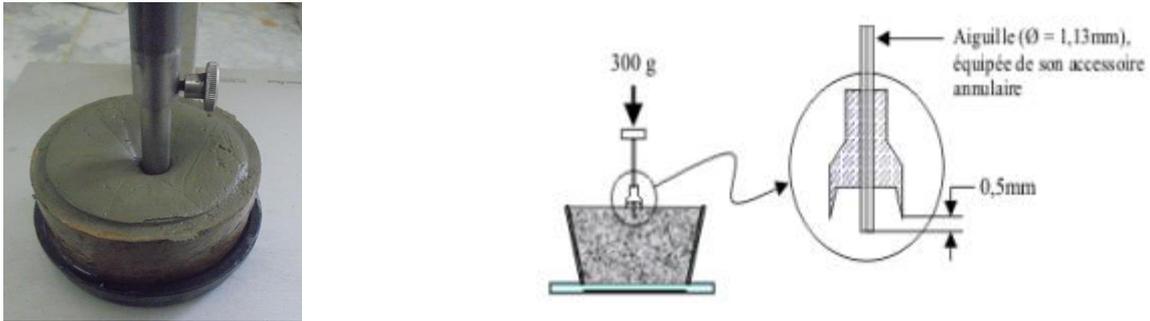


Figure III.4 : Détermination du temps de fin de prise

III.7.1. La stabilité

C'est un essai permet de s'assurer que le ciment ne contient pas de substances susceptibles de provoquer une expansion dangereuse au cours du temps.

Cet essai consiste à mesurer l'écartement des extrémités des deux aiguilles de l'appareil de « Le Châtelier »

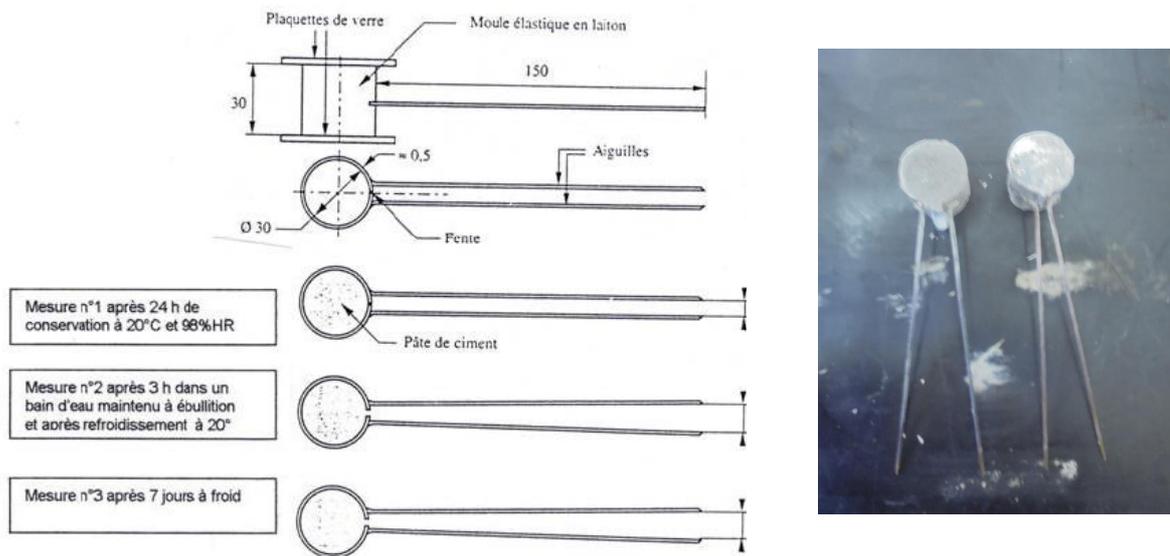


Figure III.5 : Détermination de l'expansion

Le mode opératoire est décrit par la norme EN 196-3. Il faut confectionner une pâte de consistance normalisée, qui sera introduite dans deux moules. Après remplissage, les moules

sont conservés pendant 24 h dans la salle ou l'armoire humide. Au bout de ce temps il convient de mesurer à 0,5 mm près l'écartement A entre les pointes des aiguilles. Le moule est alors entreposé dans le bain d'eau à 20°C qui doit être porté à ébullition pendant 3 h (± 5 min). Soit B l'écartement entre les points des aiguilles au bout de ce temps, et C l'écartement lorsque le moule revient à la température de 20°C, après refroidissement. La stabilité est caractérisée par la valeur C-A exprimée en mm à 0,5 mm près: Stabilité = C-A (figure. III.5).

III.7.2. Caractérisation des mortiers

Pour déterminer les résistances mécaniques des ciments, on a confectionné un mortier de référence sans additions dont la composition est celle du mortier normal défini par la norme EN196-1.

III.7.2.1. Résistance à la compression

Les résistances en compression ont été évaluées à 7 et 28 jours en utilisant une machine d'essai en compression hydraulique permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN, pourvue d'un dispositif de compression pour les moules de mortiers (photo-III.10). La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.



Photo III. 10 : Dispositif de charge en compression pour les éprouvettes de mortiers

Si S est la section transversale de l'éprouvette en (mm²) et F la charge de rupture en(N), la résistance σ sera donnée en MPa à 0.5MP après par : $\sigma_c = F / S$ Eq (III-1)

III.7.2.2. Résistance à la traction par flexion

Les résistances à la traction du mortier durci ont été évaluées à 02, 07 et 28 jours par des essais de flexion 3 points effectués sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, avec une vitesse de chargement de 50 N/s (figure III.6).

L'essai a été répété pour trois (03) éprouvettes pour chaque composition et pour chaque âge. La résistance à la flexion représente la contrainte de rupture déduite par l'équilibre entre le moment appliqué et le diagramme des contraintes en utilisant les données relatives à la figure

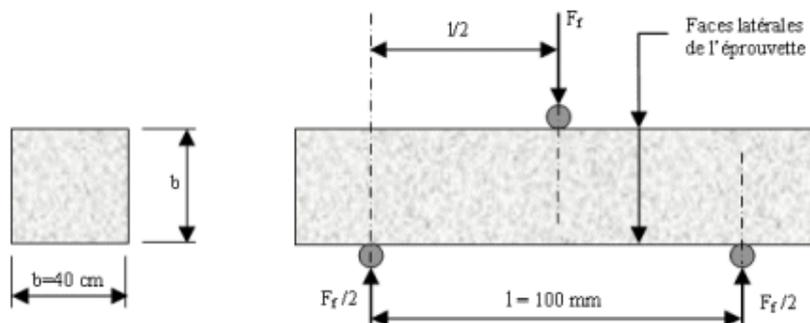


Figure III.6 : Schéma du dispositif de charge en flexion pour les éprouvettes de mortiers

Pour calculer la résistance à la traction du mortier, on applique la formule suivante :

$$R_t = \frac{1,5PL}{a^3} \quad \text{Eq (III-2)}$$

Avec,

- R_t : Résistance à la traction en Mpa.
- P : Charge de rupture en MN.
- L : Distance entre appuis inférieurs en m.
- a : Coté de l'éprouvette en m.

Dans notre cas la valeur est déterminée automatiquement avec l'appareil.

III.7.3. Caractérisation des bétons ordinaires et superplastifiés

III.7.3.1. À l'état frais

➤ L'ouvrabilité

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams ou Slump-test, est l'essai le plus utilisé pour mesurer la consistance d'un béton. Cet essai est effectué conformément à la prescription de la norme EN 12350-2. Le moule tronconique étant légèrement huilé et fixé sur la plaque d'appui, on le remplit en trois couches de hauteur équivalente avec un piquage à raison de 25 coups par couche. Après avoir arasé le bord supérieur, le moule est soulevé avec précaution. La mesure exprimée en centimètres est réalisée sur le point le plus haut du béton et à une minute du démoulage.



Photo 11: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.

➤ Masse volumique

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage, après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante:

$$M_v = (m_2 - m_1) / V \quad \text{Eq (III-3)}$$

M_v : est la masse volumique du béton frais (kg/m^3).

m_1 : est la masse du récipient (Kg).

m_2 : est la masse du récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (kg).

V : est le volume du récipient en mètre cube (m^3)

La masse volumique du béton est arrondie aux 10 kg/m^3 les plus proches.

➤ Air occlus

Le principe de la mesure de l'air occlus repose sur la compressibilité des bulles d'air contenues dans les mortiers frais et l'application de la loi de Mariotte. L'appareil de mesure classique est composé d'un bol de 8 litres dans lequel le béton est incorporé en deux couches, compactées par simple piquage (NF P 18-353). Un système de mesure donne directement le taux d'air occlus en pourcentage. L'air occlus moyen est estimé à partir de trois mesures.

III.7.3.2. À l'état durci

➤ Résistance à la compression

L'essai de compression sur les éprouvettes de béton a été réalisé conformément à la norme NF P 18- 406. Dans ce cas l'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance en compression est le rapport de la charge de rupture par la section transversale de l'éprouvette.

L'équipement nécessaire à l'essai de compression du béton comprend une presse de force et de dimensions appropriée répondant aux normes NFP 411et NFP 412 et un moyen pour la rectification des extrémités des éprouvettes tels que le surfaçage au souffre.

Pour réaliser l'essai de compression des bétons, on doit placer l'éprouvette séchée et rectifiée dans la presse et la centrer en utilisant un gabarit de centrage, procéder à la mise en charge progressive et enregistrer la charge de rupture.



Photo 12 : Essai de compression.

Si S est la section transversale de l'éprouvette en (mm^2) et P la charge de rupture en(N), la résistance f_c sera donnée en MPa à 0.5MP après par: $\sigma_c = F / S$ Eq (III-4).

L'essai a été réalisé sur trois (03) d'éprouvettes, et la valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

III.8 Caractérisation des BAP

III.8.1. À l'état frais

Les bétons autoplaçants formulés doivent satisfaire plusieurs tests normalisés qui permettent de caractériser leurs principales propriétés.

- La mobilité du béton autoplaçant en milieu non confiné, est un essai réalisé pour la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (Slump flow, SF). Cet essai est complété par la mesure du temps d'étalement pour un diamètre défini de 500 mm (T500) selon la norme EN 12350 – 8.
- La résistance à la ségrégation du béton autoplaçant est exprimée par l'essai de stabilité au tamis selon la norme EN 12350 – 11.
- La mobilité du béton autoplaçant en milieu confiné, est réalisée par l'essai du taux de remplissage dans la boîte en L, selon la norme EN 12350 – 10.

III.8.1.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams

La simplicité de cet essai (facile à être mis en œuvre tant au laboratoire que sur chantier) fait de celui-ci un essai incontournable dans la caractérisation de la consistance des bétons (figure III.7). Il permet de tester la capacité des BAP à se déformer uniquement sous le seul effet de leur poids et de s'étaler pour remplir un milieu non confiné par les mesures:

- de la capacité de remplissage (taux de remplissage ou distance atteinte dans l'espace) donnée par le diamètre final atteint par la galette de béton.
- de la vitesse de remplissage donnée par l'inverse du temps (T500) de passage à un diamètre par exemple de 500 ± 1 mm.

Le matériel et le protocole d'essai [AFG, 08] sont décrits comme suit :

⇒Matériel nécessaire

- un cône d'Abrams
- une plaque métallique carrée d'au moins 90 cm graduée à un diamètre de 500 ± 1 mm
- un mètre
- un niveau à bulle

⇒Mode opératoire

Le temps entre la fin du malaxage et le soulèvement du cône est d'environ 90 secondes.

1. Humidification du cône et de la plaque métallique
2. Remplissage du cône
3. Arasage de la surface du cône et le soulèvement le plus verticalement possible de celui-ci
4. Mesure du temps de passage au diamètre de 500 mm appelé T500
5. Mesure de l'étalement selon deux diamètres perpendiculaires, puis calcul de la moyenne
6. Remise du béton dans le seau et la protection de celui-ci contre l'évaporation en attendant d'autres essais.

L'essai d'étalement est présenté sur la figure III.7.

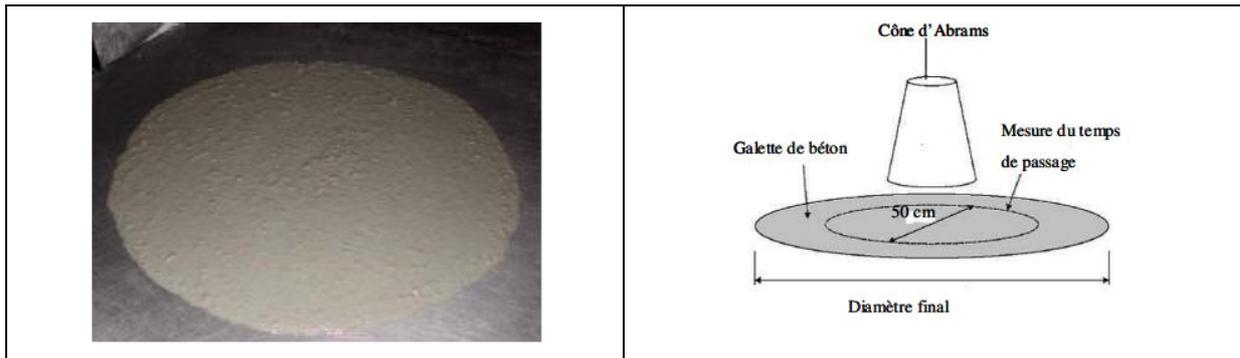


Figure III.7 : Essai d'étalement.

L'étalement caractérise la fluidité du béton, plus il est grand et plus la fluidité du BAP est grande. L'AFGC a défini trois classes d'étalement pour les BAP [AFG, 08] présentées dans le tableau III.25.

Tableau III.25 : Classes d'étalement des BAP

Classe	Étalement (mm)
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

Cet essai permet aussi d'évaluer visuellement la tendance à la ségrégation du béton. Pour un béton homogène, les granulats sont repartis uniformément. La présence d'une ségrégation se traduit par l'apparition d'une couche de laitance à la périphérie ou par l'accumulation de graviers au centre de la galette. La présence d'une ségrégation se traduit par l'apparition d'une couche de laitance à la périphérie ou par l'accumulation de graviers au centre de la galette.

III.8.1.2. Essai d'écoulement à la boîte en L

Cet essai permet de tester la capacité du béton à s'écouler dans un milieu confiné, de mesurer le taux de remplissage et le temps d'écoulement.

Le matériel utilisé lors de ce test est une boîte en L et un ferrailage à deux ou trois armatures. L'essai consiste à laisser passer à travers l'espace entre les armatures le béton du compartiment vertical vers la partie horizontale. Le protocole d'essai est décrit comme suit :

1. remplissage de la partie verticale de la boîte avec du béton (environ 13 litres), araser et attendre une minute,
2. soulever le volet pour laisser passer le béton au travers d'un ferrailage formé de deux ou trois barres.
3. mesurer les hauteurs H1 et H2 respectivement dans les parties verticale et horizontale de la boîte. La figure III.8 présente un essai à la boîte en L.

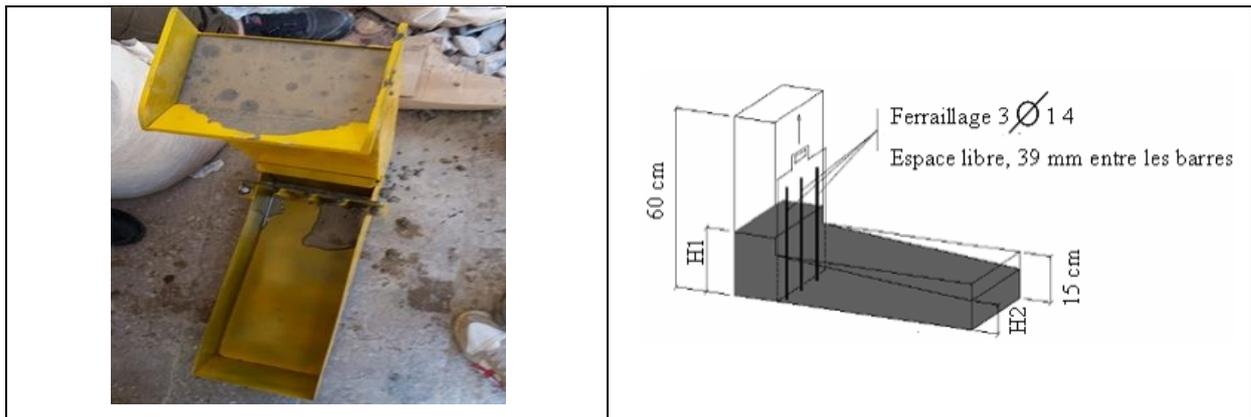


Figure III.8: Essai d'écoulement à la boîte en L.

Le ferrailage est formé de trois armatures de diamètre 14 mm Le rapport

$PA = H2/H1$ traduit le taux de remplissage du béton. PA dépend de la catégorie de BAP mais en général, le taux de remplissage d'un BAP doit être supérieur ou égal à 0.8 [AFG, 08]. Un blocage ou une ségrégation dynamique se traduit par un amoncellement de granulats en amont du ferrailage et une valeur faible de PA.

III.8.1.3. Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à qualifier les BAP vis-à-vis du risque de ségrégation statique et se déroule à la fin du malaxage.

Le matériel est composé d'un seau de 10 litres muni d'un couvercle, un tamis d'ouverture 5 mm et de diamètre 315 mm avec fond et une balance.

L'essai consiste à verser dix litres de béton dans le seau et à le laisser au repos.

Le béton est couvert pour éviter une éventuelle évaporation d'eau. Après 15 minutes

d'attente, une masse de $(4.8 \pm 0.2 \text{ Kg})$ de béton est versée d'une hauteur de $(50 \pm 5 \text{ cm})$ au centre du tamis posé sur un fond. Deux minutes plus tard, la masse de laitance dans le fond ayant traversé le tamis est pesé. Cet essai est présenté sur la figure III.9.

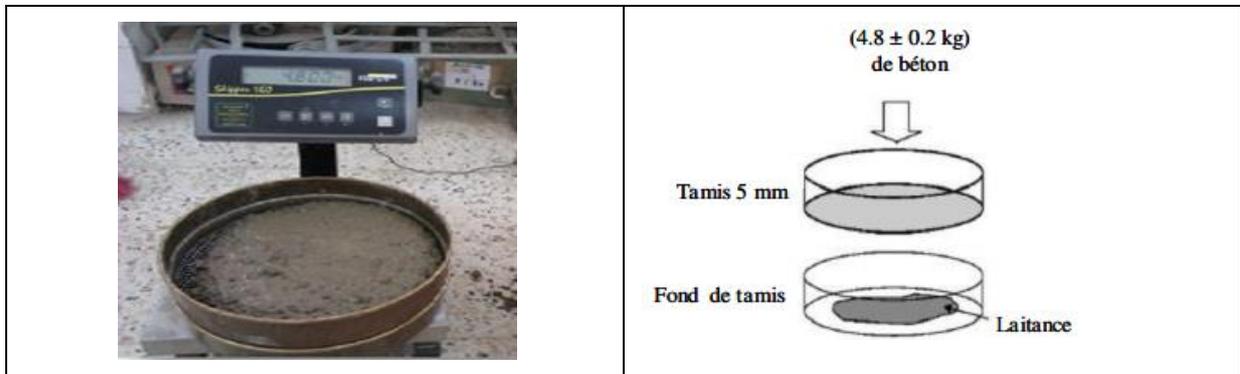


Figure III. 9: Essai de stabilité au tamis

Le pourcentage Jl en masse de laitance par rapport à La masse de l'échantillon est calculé et arrondi au pour cent près [AGF, 08] :

$$Jl = \text{Masse de laitance} \times 100 / \text{Masse de l'échantillon.}$$

La valeur Jl permet de classer les BAP. Le tableau III. 26 résume les critères de stabilité des BAP. Pourcentage de laitance SR (%)

Tableau III.26 : Critère de stabilité

Pourcentage de laitance SR(%)	Critères de stabilité	Remarques
$0 \leq Jl \leq 15$	Stabilité satisfaisante	Béton homogène et stable
$15 \leq Jl \leq 30$	Stabilité critique très mauvaise	Vérifier les autres critères d'ouvrabilité
$Jl \geq 30$	Stabilité	Ségrégation systématique, béton inutilisable

III.9.1. À l'état durci

III.9.1.1. La résistance à la compression

Mêmes procédures suivies dans le cas des bétons ordinaires et superplastifiés.

III.9.1.2. La traction par flexion

L'essai de flexion est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm³ selon les normes NF P. 18-407. Il s'agit de déterminer la résistance à la flexion (3 points) de l'éprouvette soumise à un effort centré exercé à l'aide d'une presse hydraulique



Photo 13 : Essai de traction par flexion trois points.

III.10. Composition des mélanges

Les différentes compositions des pâtes, des mortiers, des bétons ordinaires, des bétons superplastifiés et des bétons autoplacants sont représentés dans les tableaux ci-dessous.

III.10.1 Sous plan 1

Tableau III.27 : Compositions des pâtes de ciment.

Désignation	ciment (g)	Filler calcaire (g)
R	500	0
FC ₅	475	25
FC ₁₀	450	50
FC ₁₅	425	75
FC ₂₀	400	100
FC ₂₅	375	125

Tableau III.28 : Compositions des échantillons de mortier pour la résistance mécanique

Désignation	ciment(g)	Filler calcaire (g)	sable normalisé (g)	eau(ml)
R	450	0	1350	225
FC ₅	427.5	22.5	1350	225
FC ₁₀	405	45	1350	225
FC ₁₅	382,5	67,5	1350	225
FC ₂₀	360	90	1350	225
FC ₂₅	337.5	112.5	1350	225

Tableau III.29 : Compositions des pâtes à additions combinées

Designation	Ciment (g)	Filler calcaire (g)	Laitier (g)	pouzzolane (g)
FC ₁₅ LG ₅	400	75	25	--
FC ₁₀ LG ₁₀	400	50	50	--
FC ₁₅ PN ₅	400	75	--	25
FC ₁₀ PN ₁₀	400	50	--	50
FC ₁₀ LG ₅ PN ₅	400	45	25	25

Tableau III.30 : Compositions des mortiers à additions combinées.

Designation	Ciment (g)	Filler calcaire (g)	Laitier (g)	pouzzolane (g)	sable normalisé (g)	Eau (ml)
FC ₁₅ LG ₅	360	67.5	22.5	--	1350	225
FC ₁₀ LG ₁₀	360	45	45	--	1350	225
FC ₁₅ PN ₅	360	67.5	--	22.5	1350	225
FC ₁₀ PN ₁₀	360	45	--	45	1350	225
FC ₁₀ LG ₅ PN ₅	360	45	22.5	22.5	1350	225

Tableau III.31 : Compositions des bétons ordinaires.

N°	Notation	C (kg)	FC (kg)	PN (kg)	LG (kg)	S 0/4 (kg)	S 0/1 (kg)	G 3/8 (kg)	G 8/15 (kg)	G 15/25 (kg)	E (l)
1	T	350	0	0	0	423	315	177	323	541	193
2	FC ₁₀	315	35	0	0	423	315	177	323	541	193
3	FC ₁₅	297,5	52,5	0	0	423	315	177	323	541	193
4	FC ₂₀	280	70	0	0	423	315	177	323	541	193
5	FC ₁₅ LG ₅	280	52,5	17,5	0	423	315	177	323	541	193
6	FC ₁₀ LG ₁₀	280	35	35	0	423	315	177	323	541	193
7	FC ₁₅ PN ₅	280	52,5	0	17,5	423	315	177	323	541	193
8	FC ₁₀ PN ₁₀	280	35	0	35	423	315	177	323	541	193
9	FC ₁₀ LG ₅ PN ₅	280	35	17,5	17,5	423	315	177	323	541	193

Tableau III.32 : Compositions des bétons superplastifiés.

N°	Notation	C (kg)	FC (kg)	PN (kg)	LG (kg)	S 0/4 (kg)	S 0/1 (kg)	G3/8 (kg)	G8/15 (kg)	G 15/25 (kg)	E (l)	Adj (kg)
1	T1	350	0	0	0	423	315	177	323	541	193	1.75
2	FC ₁₀	315	35	0	0	423	315	177	323	541	193	1.75
3	FC ₁₅	297,5	52,5	0	0	423	315	177	323	541	193	1.75
4	FC ₂₀	280	70	0	0	423	315	177	323	541	193	1.75
5	FC ₁₅ LG ₅	280	52,5	17,5	0	423	315	177	323	541	193	1.75
6	FC ₁₀ LG ₁₀	280	35	35	0	423	315	177	323	541	193	1.75
7	FC ₁₅ PN ₅	280	52,5	0	17,5	423	315	177	323	541	193	1.75
8	FC ₁₀ PN ₁₀	280	35	0	35	423	315	177	323	541	193	1.75
9	FC ₁₀ LG ₅ PN ₅	280	35	17,5	17,5	423	315	177	323	541	193	1.75

III.10.2. Sous plan 2

Tableau III.33 : Compositions des BAP (Kg).

N°	Notation	C	FC	PV	CKD	E	E /L	S 0/4	S 0/1	G 3 /8	G 8 /15	Adj
1	BAP 1	415	73.5	--	--	174	0,37	497	356	310	470	9.18
2	BAP 2	415	55.08	--	20.89	174	0,37	497	356	310	470	9.18
3	BAP 3	415	36.72	--	41.80	174	0,37	497	356	310	470	9.18
4	BAP 4	415	18.36	--	62.68	174	0,37	497	356	310	470	9.18
5	BAP 5	415	55.08	16.72	--	174	0,37	497	356	310	470	9.18
6	BAP 6	415	36.72	33.45	--	174	0,37	497	356	310	470	9.18
7	BAP 7	415	18.36	50.18	--	174	0,37	497	356	310	470	9.18

III.10. Conclusion

- Les essais d'identification des matériaux de l'étude ont permis d'apprécier leurs qualités vis-à-vis des spécifications normatives pour un usage dans les bétons. Il s'agissait aussi de fournir des valeurs numériques précises pour calculer les dosages des différentes formules de bétons.
- La qualité des matériaux utilisés dans notre recherche, est parmi les meilleurs matériaux dans le marché algérien, ce qui nous permet de considérer leurs caractéristiques comme suffisantes pour réaliser notre étude.
- Les bétons courants et superplastifiés ont été confectionnés en utilisant la méthode de Dreux-Gorisse, en limitant le diamètre du plus gros granulat à 25 mm, l'affaissement au cône d'Abrams à 6 ± 0.5 cm et la résistance caractéristique exigée à 35 MPa.
- La formulation des BAP a été faite d'une manière empirique. Après la conception par calcul, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.
- La composition des mélanges et les procédures expérimentales vont nous permettre de mieux analyser les résultats et d'avoir une meilleure compréhension de l'influence des différents paramètres étudiés sur le comportement à l'état frais et durci des bétons confectionnés.
- Toutes les manipulations à savoir la résistance mécanique à la traction par flexion, la résistance à la compression et les essais à l'état frais pour tous les mélanges étudiés, qui sont exposées sont conformes aux normes en vigueur.
- Tous les essais effectués sont déroulés dans des meilleures conditions.
- L'analyse des résultats de ces essais et leurs interprétations seront présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Résultats & discussions

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1.Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude des propriétés des différents mélanges réalisés : liants élaborés, bétons courants, bétons superplastifiés et bétons autoplaçants BAP.

L'étude des propriétés de ces mélanges comporte quatre parties La première s'intéresse aux liants binaires notamment les propriétés physiques des pâtes à l'état frais et les résistances mécaniques des mortiers normalisés à l'état durci à 2,7 et 28 jours.

La deuxième partie concerne les propriétés physiques avec les mesures des résistances en compression effectuées à 7 et 28 jours pour les liants ternaires et quaternaires.

La troisième partie concerne les propriétés des bétons courants et superplastifiés : densité, ouvrabilité, air occlus et les résistances mécaniques en compression à 7 et 28 jours.

La quatrième partie focalise sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci des BAP confectionnés avec différentes combinaisons d'additions à savoir : le filler calcaire, la poudre de verre et la poussière du four de la cimenterie.

IV.2. Influence de l'incorporation combinée des fillers calcaire et/ou pouzzolane naturelle, laitier granulé sur les propriétés des bétons.

IV.2.1. Caractérisation des liant au fillers calcaire seul

Nous rappelons que l'objectif primordial de cette première partie d'étude est de déterminer la quantité maximale du filler calcaire, déchet récupéré au niveau des stations de concassage des granulats pour béton, qu'on peut introduire dans le ciment sans compromettre ses qualités essentielles. En effet, les résultats des essais physiques et mécaniques effectués nous donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des ciments au du filler calcaire et nous permettre de déceler leurs comportements afin de comprendre les causes à l'origine des comportements des bétons à étudiés.

IV.2.1.1. Étude sur pates

Les résultats des essais physiques à savoir, la consistance normale et le temps de début et de fin de prise ainsi que l'expansion à chaud, pour les différents mortiers testés sont présentées dans le tableau VI.1.

Tableau VI.1 : Propriétés physiques des pâtes de ciment en fonction du % de filler calcaire.

Essais (T=27°C)	R	FC ₅	FC ₁₀	FC ₁₅	FC ₂₀	FC ₂₅	Norme
Consistance (%)	26	26	26	27	28	29	/
Début de prise (min)	131	156	151	149	140	136	≥60 min
Fin de prise (min)	218	267	263	251	237	226	/
Expansion (mm)	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	≤ 10 mm

a/ La consistance

D'après les résultats obtenus, on remarque que la consistance des deux mélanges à 5% et 10% de filler calcaire est la plus proche de celle de la pâte de référence. Cependant l'augmentation de la teneur en fillers calcaire de 15% jusqu'à 25% augmente le rapport E/L en comparaison avec celui de la pâte témoin. Ce qui peut être expliqué par un mauvais empilement des particules qui demandent une quantité d'eau supplémentaire pour donner aux mélanges la consistance normalisée.

Ces constatations s'opposent à celles qui ont été faites par **Tsivilis et al, 1999** [68], où une diminution de 24 % à 22.5 % pour une substitution de 10 % à 35 % de calcaire comparant au ciment contrôle.

b/Temps de prise

On constate d'après le tableau VI.1, que les temps de début de prise augmentent pour atteindre une valeur maximale dans la pâte à 5% de calcaire. Au-delà, ils diminuent, mais qui demeurent supérieurs à celui de la pâte de référence. Toutefois, le temps de début de prise pour tous les mélanges est dans la norme qui exige un minimum de 60 minutes.

Notons aussi que l'effet retardateur que joue le calcaire est d'environ 25 minutes pour 5% d'ajout, et de 8 minutes pour 25 % d'ajout par rapport au ciment CEMI.

Donc, l'ajout des fillers calcaires affecte le temps de prise à court terme à cause du déroulement plus lent de la réaction d'hydratation.

De même en comparant les temps de fin de prise, on trouve que ces derniers augmentent pour atteindre un optimum dans le mélange à 5% de calcaire, puis diminuent. Ce qui donne à cette addition le rôle de retardateur de prise qui peut être utile en cas de bétonnage par temps chaud. Ces résultats sont différents de celles obtenus par [68] qui déclarent que le temps de prise du ciment au calcaire est similaire à celui du ciment Portland et **Voglis et al, 2005** [129] qui ont montré que l'addition du calcaire accélère le début de prise et retarde la fin de prise, par conséquent le temps de prise est prolongé par rapport à celui du ciment portland. Ainsi que d'autres chercheurs **Heikel et al, 2000** [130] qui stipulent que le début et la fin de prise varient en fonction du dosage en calcaire. Une addition de 5% de calcaire augmente et prolonge le temps de prise, par contre pour des dosages en calcaire supérieur à 20 % le début et la fin de prise diminuent.

Les différences de résultats peuvent être expliquées en matière de variabilité de la taille des particules de ciment systèmes de distribution, finesse, type de clinker et de liant.

c/ Expansion à chaud

Cet essai permet de s'assurer que le ciment ne contient pas certains éléments provoquant à long terme des anomalies à la résistance et présentant après la prise des fissures dans la masse du liant.

On remarque que tous les mélanges présentent une bonne stabilité volumique parce que les valeurs de gonflement à chaud sont inférieures à 10 mm (la norme NF P 15-301). La décroissance de l'expansion avec l'augmentation du taux de calcaire est due à la diminution de la chaux libre qui provoque des changements de volume du ciment lors de l'hydratation.

IV.2.1.2. Résistance à la compression

Les résultats des résistances à la compression des ciments durcis à 2, 7, 28 jours sont représentés dans la figure VI.1.

D'après cette figure, On observe des réductions de résistance de plus en plus que le taux de substitution au calcaire augmente et cela pour tous les âges. Ce résultat est dû en premier lieu à la diminution de la teneur en ciment et à l'augmentation du rapport eau-ciment, à mesure que la substitution augmente ce qui est en accord à ce qui a été annoncé par **Courard et Michel, 2007** [10] et en deuxième lieu aux arguments exposés ci-après.

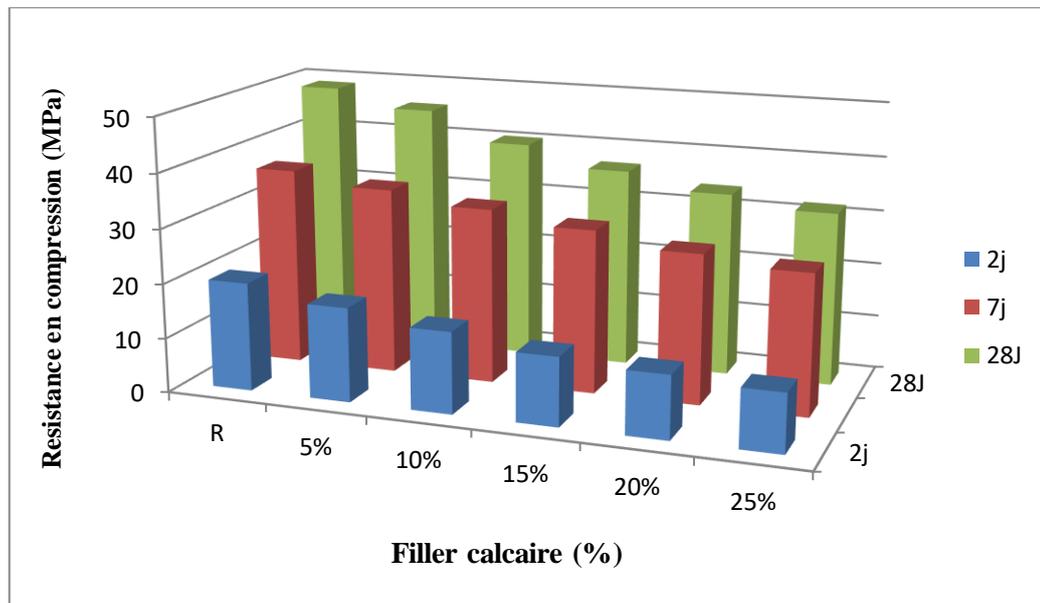


Figure IV.1 : Évolution de la résistance à la compression des ciments durcis en fonction du pourcentage de filler calcaire.

a/ Effet du taux d'ajout à 2 jours

Nous remarquons que le mortier de référence R présente une résistance en compression à 02 jours supérieur à celle des mortiers à filler calcaire de près de 15.21 % (FC₅) ; 33.17 % (FC₁₀) ; 58.01% (FC₁₅) ; 71.78% (FC₂₀) et de 85.9 % (FC₂₅) respectivement. Ces résultats se divergent des résultats de l'étude faite par [68] qui a prouvé que la résistance à 2 jours d'un mortier contenant 10 % de calcaire est similaire à la résistance du mortier de contrôle, par contre elle diminue de 18 % pour une substitution de 20 % de calcaire.

Ce comportement est probablement dû à la faible réactivité du filler calcaire introduit du fait de sa finesse comparable à celle du ciment et à la faible teneur en C₃A du ciment CPA, car le C₃A a tendance à accélérer le processus d'hydratation du ciment et à favoriser les résistances à jeunes âges.

À cet effet, on peut conclure que le filler calcaire a comme effet de ralentir la vitesse du processus d'hydratation du liant.

b/Effet du taux d'ajout à 7 jours

Les résistances en compression à 07 jours décroissent pour tous les taux de substitution du ciment. Néanmoins, elles atteignent une valeur comparable à celle du mortier témoin au

voisinage de 5 % taux de substitution du ciment par le filler calcaire. Puis, elles continuent à décroître proportionnellement aux taux de substitution du ciment par l'addition avec une intensité plus importante d'un mortier à autre. Les pourcentages de cette dégression sont : 06.20 % (FC₅) ; 13.22 % (FC₁₀) ; 22.06% (FC₁₅) ; 21.45% (FC₂₀) et de 41.08 % (FC₂₅) successivement. Ces pourcentages sont généralement faibles par rapport à ceux enregistrés pour les mélanges à deux jours.

L'approche de résistance à cet âge peut être attribuée à la contribution tardive et limitée du filler calcaire à l'accélération de l'hydratation des C₃S en présence des particules de calcaire CaCO₃ d'une part et à la réaction qui se produit entre les C₃A du ciment et les particules de calcaire formant ainsi des carbo-aluminates de calcium hydratés qui se précipitent dans les pores d'autre part d'où le gain de résistance [131].

Donc, nous pouvons dire que le filler calcaire n'est pas totalement inerte.

c/ Effet du taux d'ajout à 28 jours

L'amélioration relative des résistances en compression à 07 jours ne se reproduit pas pour les résistances en compression à 28 jours. Ces dernières diminuent directement sans aucune amélioration et descendent au-dessous de 53 % de la résistance du mortier de référence pour le taux de 25 % de substitution du ciment par le filler calcaire. Ainsi, les taux de décroissance sont respectivement 11.89 % ; 20.91% ; 33.11% ; 44.40% et 53.44.36% lorsque le pourcentage du calcaire passe de 5 % à 25 %.

Des résultats similaires, mais avec des valeurs plus faibles avaient été observés dans des travaux antérieurs. **Lee et al, 2008** [132] ont trouvé que la résistance à 28 jours des mortiers diminue de 5.83 % et 27.16 % avec l'augmentation du pourcentage du calcaire de 10% à 30% de calcaire respectivement. Par ailleurs, **Boubaker, 2009** [83] prétend qu'à 28 jours, la résistance à la compression diminue de 11 % et de 41 % avec l'augmentation du pourcentage du calcaire de 10 % à 25 % respectivement.

Nous pouvons donc déduire que l'action du filler calcaire sur le ciment tend à disparaître à 28 jours.

d/Évolution de la résistance à la compression des ciments en fonction du temps

La figure IV.2 présente l'évolution de la résistance à la compression des ciments durcis en fonction du temps et des taux de substitution du ciment par le filler calcaire.

On remarque que, pour tous les mortiers la résistance à la compression augmente progressivement avec l'âge de conservation dans l'eau, ce qui peut s'expliquer par le développement du phénomène d'hydratation du ciment en fonction du temps en présence d'une humidité suffisante.

Ces résultats montrent, également, qu'en fonction du temps, et durant les premiers sept jours, l'augmentation de la résistance en compression du mortier à 15% de calcaire est la meilleure comparativement aux résistances présentées par les autres variantes. Elle atteint 17,37 MPa. Au-delà de cette échéance, les taux d'évolution de la résistance en compression diminuent à des valeurs variables, la meilleure est obtenue dans le mélange R avec 12,41MPa.

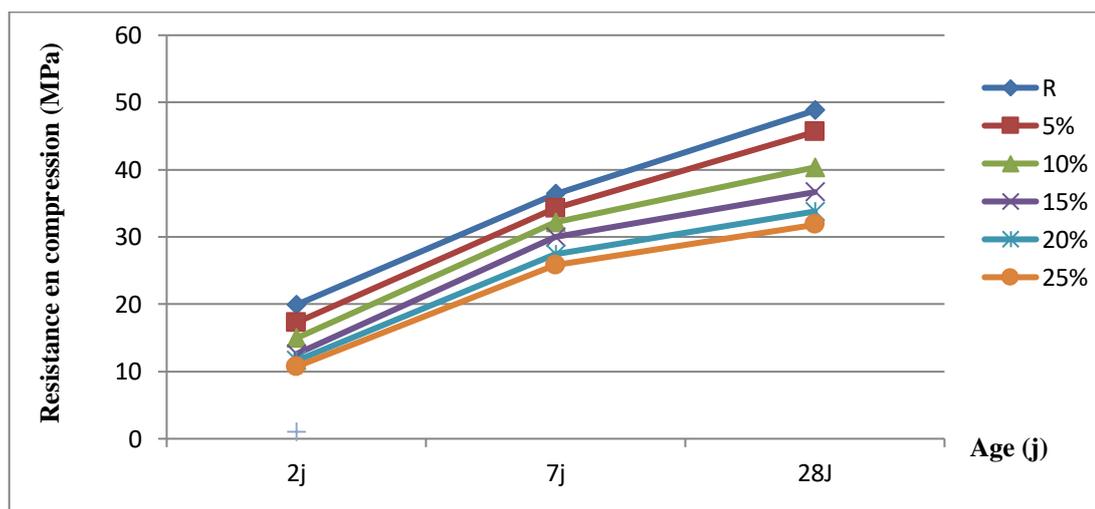


Figure IV.2: Évolution des résistances en compression des ciments en fonction de l'âge.

IV.2.1.3. Résistance à la flexion

La figure IV.3 présente l'évolution de la résistance à la flexion des mortiers en fonction du taux de substitution du ciment par le filler calcaire.

Nous remarquons que le mortier FC₅ présente une résistance à la traction à 02 jours inférieure à celle du mortier de référence R de près de 5.2 % ; par contre, ses deux valeurs à 7 et 28 jours diminuent de près de 1.8 % et 3.6 respectivement.

On constate, aussi, l'influence néfaste du calcaire sur la résistance à la traction par flexion des

autres mortiers à l'âge de 2,7 et 28 jours.

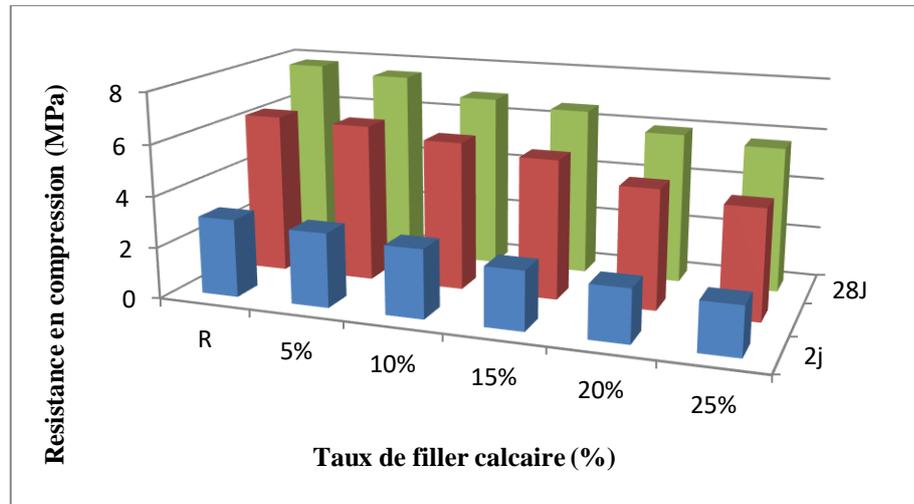


Figure IV.3: Évolution de la résistance en flexion des ciments durcis en fonction du pourcentage du filler calcaire.

Ce comportement est similaire aux résistances en compression et est probablement dû à l'effet physique du calcaire qui a contribué étroitement à combler les vides et à créer des sites supplémentaires de nucléation qui favorisent l'hydratation des grains de ciments du fait de la faible teneur en C3A du ciment CPA et à la diminution de la teneur en ciment et à l'augmentation du rapport eau-ciment, à mesure que la substitution augmente.

IV.2.1.4. Bilan

À travers notre étude précédente, nous concluons qu'un pourcentage de 5 % de filler calcaire nous permet de nous rapprocher des résistances du ciment CPA. Au-delà de ce pourcentage, son effet est néfaste.

IV.2.2. Caractérisation des liants ternaires et quaternaires

En se basant sur les résultats obtenus dans la partie précédente, et dans l'objectif de valoriser une quantité de filler calcaire nettement supérieure et de réduire à la fois la quantité de ciment utilisée dans la fabrication des bétons, nous proposons de préparer cinq combinaisons à partir du mélange à 20% de filler calcaire en substituant deux pourcentages (5 et 10) de fillers calcaires par la pouzzolane naturelle ou le laitier de hauts fourneaux respectivement. Le dernier mélange se compose à base de 10% de poussière de calcaire et 5% de chacune de ces deux additions minérales.

Cette caractérisation des liants exposée dans cette section présente un aspect pratique pour la compréhension des phénomènes se produisant sur les bétons ordinaires et les bétons superplastifiés à base des additions combinées.

IV.2.2.1. Études sur pâtes

La consistance ainsi que les temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment en fonction des quantités du filler calcaire, du laitier granulé de hauts fourneaux et de la pouzzolane naturelle introduite sont donnés par le tableau VI.2.

Tableau VI.2 : Propriétés physiques des pâtes de ciment en fonction des combinaisons d'additions

Essais (T=27°C)	R	FC ₂₀	FC ₁₅ LG ₅	FC ₁₀ LG ₁₀	FC ₁₅ PN ₅	FC ₁₀ PN ₁₀	FC ₁₀ LG ₅ PN ₅
Consistance (%)	26	28	27	26	27	26	26
Début de prise (min)	131	140	156	144	152	147	155
Fin de prise (min)	218	237	273	267	277	261	278
Expansion (mm)	0,4	0,3	0.5	00	00	00	00

a/ Effet du type d'ajout sur la consistance

➤ Effet des couples calcaire/laitier

On constate d'après le tableau VI.2 que l'addition du laitier granulé diminue la demande en eau par rapport au mélange FC₂₀ et le rapport E/L devient égal à celui du mélange de référence pour le mélange FC₁₀ LG₁₀.

Donc, L'incorporation du laitier granulé dans les pâtes contenant du calcaire a induit une diminution de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale de la pâte.

➤ Effet des couples calcaire/pouzzolane

On remarque que, l'introduction de la pouzzolane naturelle dans les pâtes renfermant le filler

calcaire se traduit par une diminution de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normalisée.

➤ **Effet de la combinaison calcaire-pouzzolane- laitier**

L'utilisation combinée de la pouzzolane naturelle et du laitier granulé dans le mélange à base de 20% de FC a également diminué la demande en eau pour avoir la consistance normale.

Ce comportement indique une optimisation du squelette granulaire de la matrice cimentaire pour les mortiers avec additions minérales fines à faibles taux de substitution du ciment. Les particules de l'addition viennent dans ce cas remplir une partie de la porosité intergranulaire du squelette solide et libérer l'eau remplissant habituellement ces pores. Ainsi la quantité d'eau nécessaire à la lubrification des particules pour donner au mélange la consistance de référence se trouve réduite.

b/ Effet du type d'ajout sur le temps de prise

➤ **Effet des couples calcaire/laitier**

On constate d'après le tableau VI.2 que le temps de prise augmente par rapport à celui du mélange FC₂₀ pour les deux pourcentages d'ajout de laitier granulé dans le ciment contenant le filler calcaire. Néanmoins, ce temps de prise demeure supérieur à celui du mélange control. Ceci est justifié par la nature des réactions d'hydratation des ciments au laitier, qui se déroulent lentement, à cause de la diminution du pourcentage des aluminates tricalciques C₃A et l'augmentation des silicates bicalciques C₂S accompagné d'une diminution des silicates tricalciques C₃S dans la composition minéralogiques des ciments [83].

➤ **Effet des couples calcaire/pouzzolane**

D'après le même tableau, il est nettement clair que les temps de début et de fin de prise des mélanges contenant la pouzzolane naturelle conjuguée au filler calcaire augmentent. Ceci s'explique par le fait que la réaction d'hydratation est retardée à court terme et que l'augmentation de la surface spécifique du liant raccourcit les délais de prise.

➤ **Effet de la combinaison calcaire-pouzzolane- laitier**

On remarque que le temps de fin de prise est plus retardé que celui du ciment control. Cela s'explique par le fait que la réaction chimique est relativement lente.

Donc, le temps de prise des pâtes renfermant les différentes combinaisons d'additions dépendent du type de ciment, du rapport E/L et des taux de substitution.

c/ Effet du type d'ajout sur la stabilité

On remarque que tous les mélanges présentent une bonne stabilité volumique parce que les valeurs de gonflement à chaud sont inférieures à 10 mm (la norme NF P 15-301).

IV.2.2.2. Étude sur mortier normalisé

a/ Effet du type d'ajout sur la résistance à la compression

Dans cette étape, nous essayons de quantifier et montrer l'origine de l'accroissement des résistances mécaniques dans les bétons formulés avec ces liants.

Les résultats de l'évolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction du taux d'addition sont résumés dans la figure VI.4

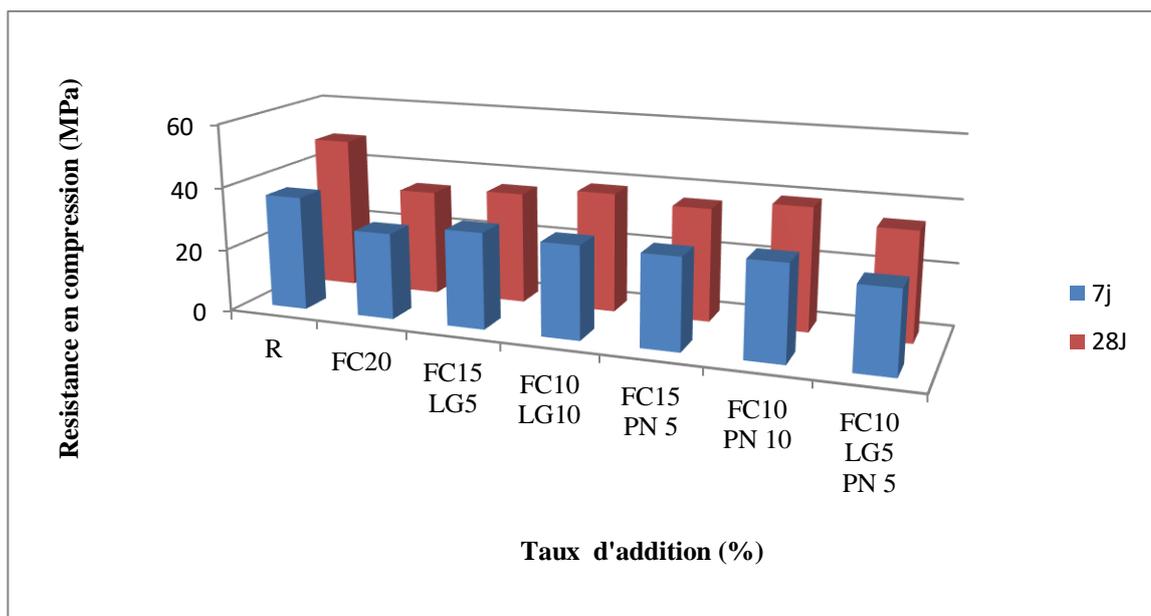


Figure IV.4 : Évolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction des taux d'additions.

➤ Effet des couples calcaire/laitier

La présence du laitier dans la composition des mortiers contenant du calcaire a donné des résistances à la compression faible par rapport au mortier témoin pour les deux échéanciers 7

et 28 jours. Les deux variétés FC₁₅ LG₅ et FC₁₀ LG₁₀ s'éloignent de près de 23.73% et 19.46% à 7 jours et de près de 36.53% et 27.54% à 28 jours respectivement du mortier de référence.

Ce phénomène peut être attribué à la contribution du calcaire à la diminution de l'hydratation aux jeunes âges et à l'hydratation latente de laitier granulé [133] avec la faible hydraulité du laitier d'el Hadjar [134].

On constate aussi, que la substitution des deux taux 5% et 10% de filler calcaire respectivement par le laitier de hauts fourneaux dans les mélanges à 20% de filler calcaire a contribué à améliorer les résistances de ces deux mélanges par rapport au mélange FC₂₀. Cependant,

L'amélioration de la résistance des deux variétés FC₁₅ LG₅ et FC₁₀ LG₁₀ comparativement au mélange FC₂₀ s'explique par le fait, qu'une petite réaction immédiate du laitier se produit et qui libère des ions calcium et aluminium dans la solution. Par la suite le laitier de haut fourneau réagit avec les hydroxydes alcalins puis avec l'hydroxyde de calcium libéré par le clinker pour former alors les CSH, Tutti, 1982 cité par [106].

Donc, l'incorporation du laitier de haut fourneau en substitution partielle d'une partie de filler calcaire n'a pas engendré un effet bénéfique sur l'évolution des résistances à 7 et 28 jours comparativement au mortier témoin.

➤ Effet des couples calcaire/pouzzolane

Les résistances des mortiers contenant les fillers calcaires et la pouzzolane naturelle sont faibles par rapport à celle du mortier contrôle à 7 et 28 jours respectivement. En effet, l'évolution des résistances des deux variantes FC₁₅ PN₅ et FC₁₀ PN₁₀ se divergent de celles enregistrées dans le cas de l'ajout de laitier de haut fourneau. L'éloignement des valeurs par rapport au mortier témoin est de l'ordre de 25.95% et 21.13% à 7 jours et 35.66% et 24.93% respectivement. Cette faiblesse de résistance à la compression peut être attribuée à la contribution du calcaire à diminuer l'hydratation du ciment d'une part et à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et qui se développe à long terme en fixant la portlandite Ca(OH)₂ libérée par l'hydratation du ciment Portland donnant naissance à des C-S-H supplémentaires de deuxième génération occupant un espace important de la matrice cimentaire et contribuant ainsi au développement de la résistance [107].

Nous remarquons aussi, que la substitution des deux taux 5% et 10% de filler calcaire respectivement par la pouzzolane naturelle dans les mélanges FC₂₀ de filler calcaire a contribué à améliorer les résistances comparativement aux mélanges à 20% de filler calcaire aux deux échéanciers 7 et 28 jours. Ce comportement peut être attribué à un effet filler de la part de la pouzzolane naturelle du fait que sa finesse est plus importante que celles du ciment et du filler calcaire.

➤ Effet de la combinaison calcaire-pouzzolane- laitier

La résistance du mortier renfermant à la fois le filler calcaire, la pouzzolane naturelle et le laitier granulé de hauts fourneaux présente une valeur qui s'éloigne par rapport au mortier témoin de 41.09% à 7 jours et de 41.15% à 28 jours. Ce résultat est dû au caractère du calcaire qui diminue la réaction d'hydratation ainsi que la propriété latente de l'hydratation des ciments avec la pouzzolane et le laitier.

b/Variation de la résistance en compression en fonction de l'âge

La figure IV. 12 illustre les variations de la résistance à la traction des mortiers renfermant le filler calcaire seul et les combinaisons d'additions filler calcaire- laitier ; filler calcaire-pouzzolane naturelle et filler calcaire- laitier- pouzzolane naturelle.

Il est nettement clair que les résistances à la compression des mortiers normalisés durcis avec ajout évoluent régulièrement avec le temps et ne présente aucune chute de résistance. Néanmoins, L'évolution de la résistance dans le mortier témoin est la plus importante.

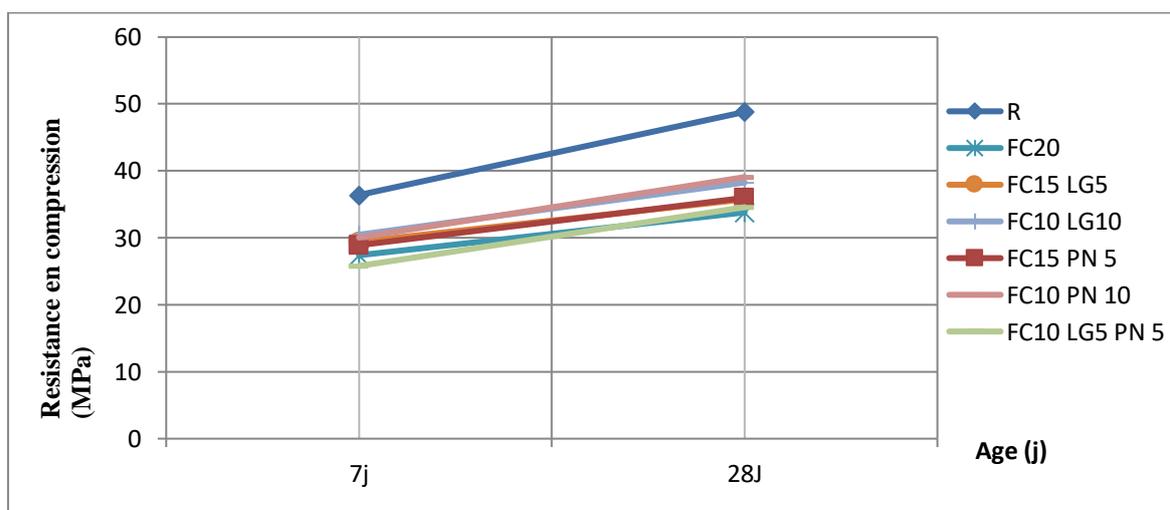


Figure IV.5 : Évolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de l'âge.

IV.2.3. Caractérisation des bétons ordinaires et superplastifiés

Le stade ultime de cette investigation est l'introduction du déchet (filler calcaire) dans la confection du béton et l'étude de l'effet de l'interaction entre le ciment, les additions combinées et le superplastifiant sur les propriétés des bétons. Mais comme il est difficile de comprendre les phénomènes mis en jeu, cette partie de l'étude consiste à étudier le rôle du filler calcaire seul et combinée au laitier granulé et/ou pouzzolane naturelle des bétons sans adjuvant et sur des bétons superplastifiés.

IV.2.3.1. Propriétés des bétons à l'état frais

a/ Masse volumique

Les masses volumiques réelles, à l'état frais des bétons courants et des bétons à superplastifiant, sont représentées par les figures IV.6 et IV.7 respectivement. Les valeurs présentées sont la moyenne de trois mesures.

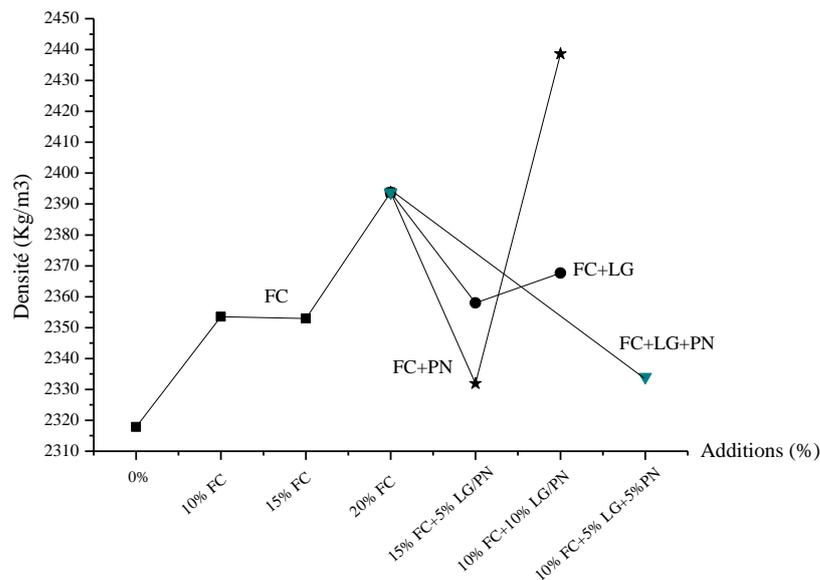


Figure IV.6 : Évolution de la masse volumique des bétons courants en fonction du taux de fines

➤ Effet de type d'ajout sur la masse volumique des bétons courants

Les densités à l'état frais sont relativement proches pour l'ensemble des formulations variant entre 2318 kg/m^3 pour le béton témoin et 2393 kg/m^3 pour celui incorporant 20% de filler de calcaire.

- **Filler calcaire**

La masse volumique du béton aux fines calcaires est systématiquement plus élevée que celle du béton de référence comme rapporté par [135]. Les pourcentages sont de l'ordre de 1.51% (FC10), 1.49 (FC15) et 3.17% (FC20) respectivement.

- **Couple calcaire /pouzzolane naturelle**

La substitution d'une partie de calcaire par la pouzzolane naturelle augmente la densité pour les deux taux de remplacement. Elles sont supérieures à la densité de référence de 0,60% (FC₁₅ PN₅) et de 4,95% (FC₁₀ PN₁₀) successivement.

- **Couple calcaire / laitier granulé**

De même, l'incorporation de laitier granulé dans les deux mélanges à 15% et 10% de calcaire améliore la densité du béton de référence respectivement de 1,70% (FC₁₅ LG₅) et de 2,10% (FC₁₀ LG₁₀).

- **Combinaison Calcaire /pouzzolane naturelle / laitier granulé**

L'introduction conjuguée de laitier granulé et de la pouzzolane naturelle donne une densité légèrement supérieure à celle du béton témoin. Le pourcentage de cette croissance est de l'ordre de 0,61%.

En effet, les particules de fines de petite taille s'insèrent dans les vides et les pores capillaires : ils densifient ainsi le squelette du béton.

➤ **Effet de l'adjuvant sur les masses des bétons avec additions et superplastifiant**

La figure IV.7 montre l'évolution de la masse volumique des différentes compositions de béton formulé. On note que :

Le remplacement du ciment par les fines en présence de l'adjuvant a diminué la densité de tous les mélanges à l'exception du mélange BFC₁₀ LG₅ PN₅.

Donc, l'introduction du superplastifiant a corrigé l'arrangement total des particules dans la matrice cimentaire à faible taux de substitution du ciment. Cette optimisation tend à disparaître aux dépens des frictions intergranulaires qui sont plus visibles pour la combinaison FC₁₀ LG₅ PN₅.

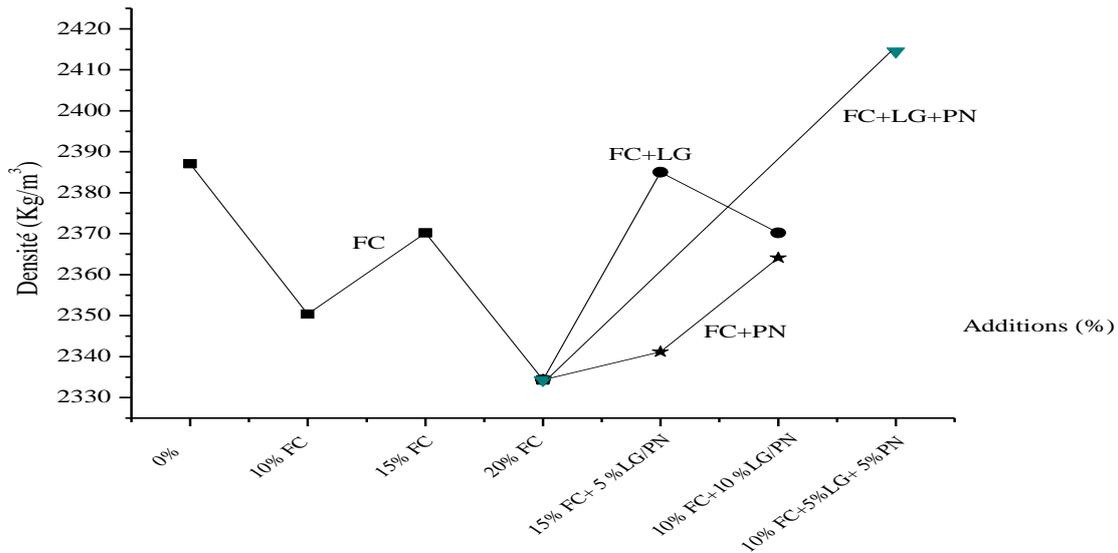


Figure IV.7 : Évolution de la masse volumique des bétons à superplastifiant en fonction du taux de fines

➤ **Apport de l'adjuvant et des additions sur la masse volumique du béton témoin**

La figure IV.8 illustre l'apport des additions et de l'adjuvant sur la masse volumique du béton témoin.

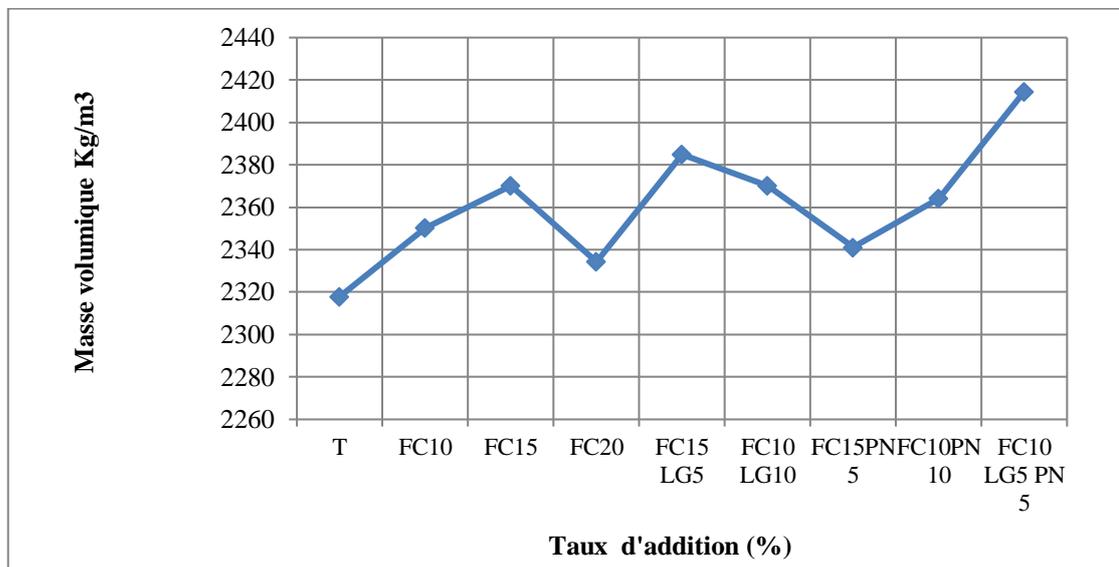


Figure IV.8 : Évolution de la masse volumique du béton témoin en fonction du taux d'addition et de l'adjuvant.

On constate que l'introduction simultanée des additions minérales et de l'adjuvant à base de polycarboxylate dans la formulation de référence a conduit à augmenter la densité initiale de 1,38% (FC₁₀) ; 2,21% (FC₁₅) ; 0,7% (FC₂₀) ; 0,99% (FC₁₅PN₅) ; 1,96% (FC₁₀PN₁₀) ; 2,81%

(FC₁₅ LG₅) ; 2,21% (FC₁₀ LG₁₀) et 4,00% (FC₁₀ LG₅ PN₅).

On déduit alors, que les additions minérales qui sont des fillers, interviennent par leurs finesses et s'insèrent dans les petits vides entre les grains fins de sable, de gravier et du ciment, il en résulte une meilleure compacité ; ce qui justifie l'augmentation de la masse volumique.

La contribution du superplastifiant se manifeste par une correction de l'arrangement des micros grains qui s'infiltreront dans les micros vides en augmentant la compacité du béton.

Donc on peut dire que l'augmentation de la masse volumique du béton témoin (sans adjuvant et sans superplastifiant) est dû à l'effet granulaire de la part des différentes additions en fonction de leurs taux de substitution et de la nature des combinaisons élaborées ainsi que l'effet de dispersion exercé par le superplastifiant qui assure une meilleure mobilité.

b/ Ouvrabilité

La figure IV.9 présente la variation de l'ouvrabilité de tous les mélanges en fonction de taux des fines additionnées pour un rapport E/L constant.

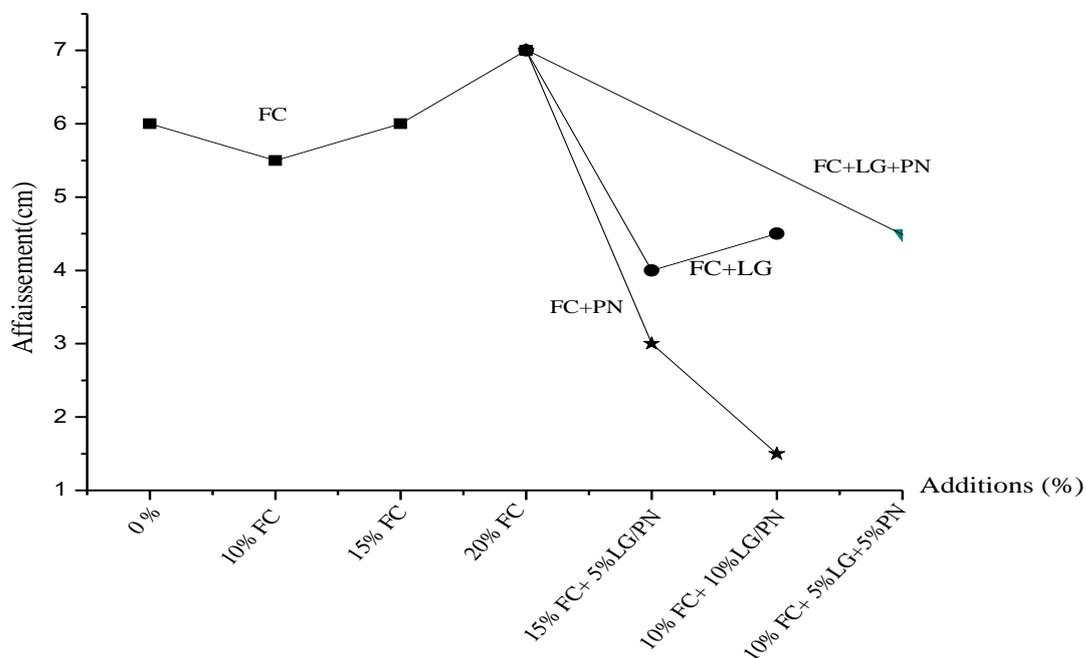


Figure IV.9 : Variation de l'ouvrabilité pour les bétons courants en fonction de taux d'additions.

En fonction des affaissements obtenues sur la figure IV.9, la classe de consistance des bétons prés mélangés au FC est plastique (l'affaissement varie de 5 à 7 cm). Cependant les bétons contenant les combinaisons d'additions FC LG, FC PN et FCLGPN sont fermes (l'affaissement varie entre 1.5 et 4.5 cm).

➤ **Effet de type d'ajout sur l'ouvrabilité des bétons ordinaires**

• **Filler calcaire**

L'incorporation d'un taux croissant de la poussière de calcaire a diminué la consistance du BFC₁₀. Au-delà l'affaissement augmente pour atteindre un optimum pour le mélange à 20% de filler calcaire. Ceci peut être attribué aux particules fines de l'addition qui remplissent les vides disponibles entre les particules du mortier et libèrent ainsi la quantité d'eau piégée. Cette eau agit comme un lubrifiant supplémentaire [136]. La baisse de maniabilité pour le taux de 10% en remplacement du ciment est dû à la contribution du calcaire à l'accélération de l'hydratation de l'aluminate tricalcique ainsi que la formation de l'étringite [137].

• **Couple calcaire /pouzzolane naturelle**

Pour les bétons contenant de la pouzzolane naturelle et de le filler calcaire, l'affaissement reste pratiquement inférieur à celui du béton témoin. Ce résultat s'explique par la finesse élevée de la pouzzolane par rapport à la finesse du ciment et celle de la FC qui nécessite plus d'eau pour être mouillé.

• **Couple calcaire / laitier granulé**

La substitution du ciment par la poussière de calcaire et laitier engendre une réduction de l'ouvrabilité par rapport au béton conventionnel mais qui demeure supérieure à celle présenté par la pouzzolane. Ce phénomène s'explique par le faible taux d'absorption d'eau par les grains de laitiers granulé au début du malaxage comparativement à celui du ciment et de la pouzzolane naturelle.

• **Combinaison Calcaire /pouzzolane naturelle / laitier granulé**

Pour le béton renfermant à la fois la poussière de calcaire, le laitier et la pouzzolane l'affaissement est comparable à celui du mélange BFC₁₀ LG₁₀. Ceci peut être attribué aux frictions intergranulaires entre les particules de forme et de taille différentes.

Donc l'affaissement des mélanges dépend de la finesse et de la nature minéralogique des additions utilisées.

➤ **Effet de l'adjuvant sur l'ouvrabilité des bétons avec additions**

Il est nettement clair d'après la figure IV.10 que l'affaissement est significatif par rapport aux mélanges sans adjuvant. L'affaissement des bétons contenant seulement les FC varie entre 12 et 7 cm. Les deux mélanges FC₁₀ et FC₂₀ sont des bétons plastiques. Le BLG₅ PN₅ présente la plus grande fluidité. On parle ici d'étalement (23 cm).

Les bétons à base de calcaire et de laitier ou de la pouzzolane naturelle octroient des affaissements importants de l'ordre de 13.6 cm, 19.4cm pour BFC15 LG5, BFC10 LG10 et 16 cm et 14.9cm BFC15PN 5, BFC10PN 10 respectivement. La gamme des bétons ainsi confectionnés est celle des bétons plastique et très plastique.

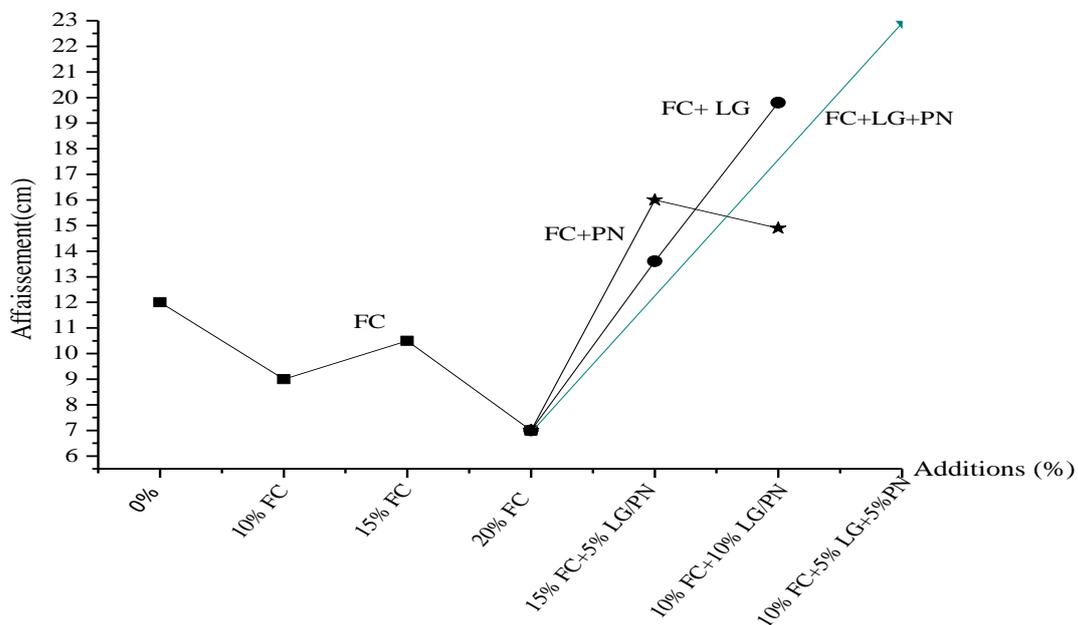


Figure IV.10 : Variation de l'ouvrabilité pour les bétons à superplastifiant en fonction de taux des fines.

L'introduction du superplastifiant à base de polycarboxylate au béton a permis d'aboutir à des bétons très ouvrables. En effet, il a permis de defloculer les grains du liant. La dispersion qui en résulte réduit la viscosité de la pâte de ciment et augmente l'ouvrabilité [138].

➤ **Apport de l'adjuvant et des additions sur l'ouvrabilité du béton témoin**

Sur la figure IV.11, les résultats de la variation de l'ouvrabilité du béton témoin T en fonction du type d'addition et du superplastifiant.

On note que l'introduction conjuguée des additions minérales et du superplastifiant dans la

composition du béton témoin T a permis d'améliorer l'ouvrabilité de tous les mélanges. Les taux de progression sont: 33,33% (FC₁₀) ; 42,86% (FC₁₅) ; 14,29% (FC₂₀) ; 62,50% (FC₁₅PN₅) ; 59,73% (FC₁₀PN₁₀) ; 55,88% (FC₁₅ LG₅) ; 69,70% (FC₁₀ LG₁₀) et 73,91 (FC₁₀ LG₅PN₅).

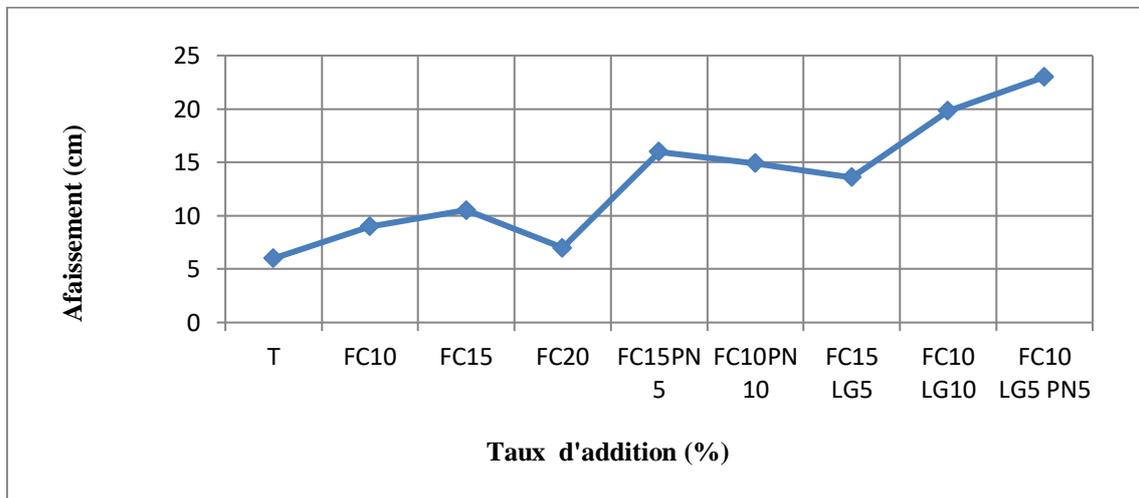


Figure IV.11 : Variation de l'ouvrabilité du béton témoin T en fonction du taux de superplastifiant et de taux d'addition.

Donc l'incorporation du superplastifiant dans le béton a entraîné une modification de l'ouvrabilité, chaque modification est tributaire du type ciment utilisé.

c/Air occlus

Les résultats des mesures effectuées sur les bétons ordinaires et superplastifiés sont représentés sur les figure IV.12 et IV.13 respectivement.

➤ **Bétons ordinaire avec additions**

D'après la figure IV.12, on remarque que toutes les valeurs sont incluses dans un intervalle variant de 1.1(T)% et 4.5% (FC₁₀ LG₁₀) et sont supérieures à celle du béton témoin.

On note une augmentation de l'ordre de: 53,59 % (FC₁₀) ; 51,11% (FC₁₅) ; 71,94% (FC₂₀) ; 60,00% (FC₁₅ LG₅) ; 75,56% (FC₁₀ LG₁₀) ; 63,70% (FC₁₅ PN₅) ; 63,58% (FC₁₀ PN₁₀) et 24,66% (FC₁₀ LG₅ PN₅).

Donc, nous pouvons déduire que l'augmentation de quantité d'air occlus dans les mélanges à base des additions est probablement le résultat de la formation des congglomérats de

particules à cause de la divergence de leurs formes et de leurs finesses ainsi que d'autres facteurs [139].

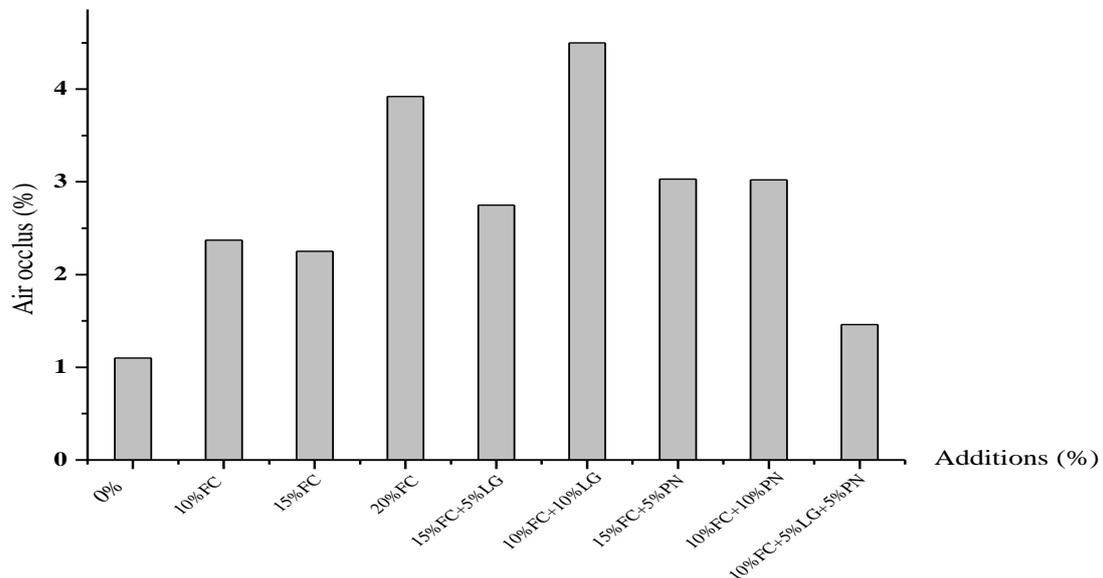


Figure IV.12 : Variation de l'air occlus des bétons courants en fonction de taux de fines.

➤ Béton avec additions et superplastifiant

Quant aux bétons à superplastifiant, les valeurs de l'air occlus représentées sur la figure IV.13 sont inférieures à celle obtenu pour le béton témoin T, excepté les deux mélanges BFC₁₀LG₁₀ et BFC₁₀LG₅PN₅.

En effet, Le superplastifiant a permis de réorganiser les particules dans les mélanges et d'avoir un empilement des constituants correct, mais il semble que la quantité d'air occlus est indépendante du taux de substitution du ciment par les additions.

Ainsi, l'utilisation d'un superplastifiant dans les bétons ordinaires contenant des additions en substitution partielle du ciment permet de réduire la quantité d'air dans les mélanges FC₁₀, FC₂₀, FC₁₀LG₁₀, FC₁₅PN₅, LF₁₀PN₁₀ respectivement et les rendre par conséquent plus résistants au gel.

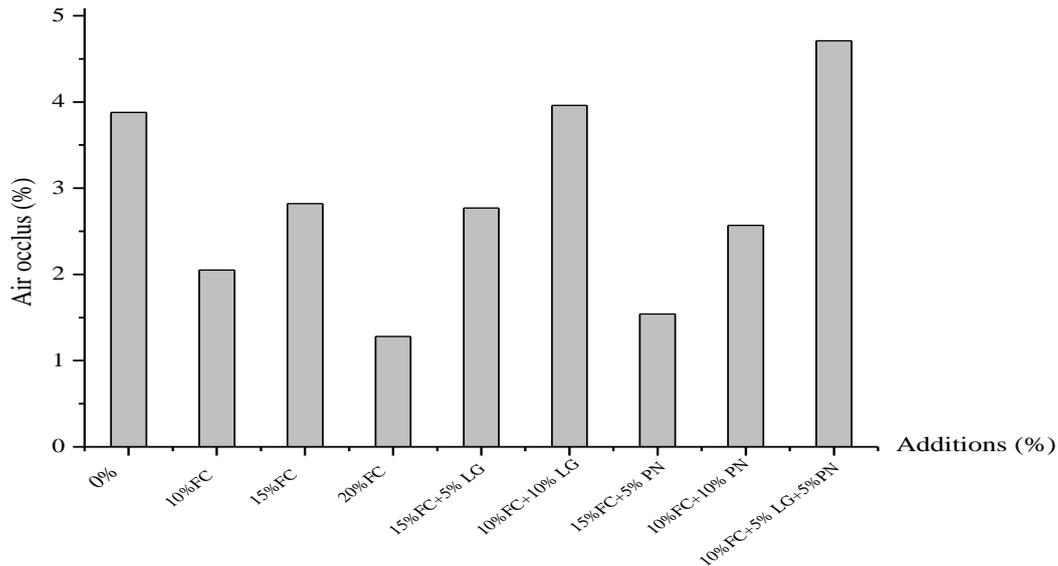


Figure IV.13 : Variation de l’air occlus des bétons à superplastifiant en fonction de taux de fines.

➤ **Variation de l’air occlus du béton témoin avec taux d’additions et superplastifiant**

On remarque sur la figure IV.14 que l’air occlus croit pour tous les mélanges par rapport au mortier témoin T (sans additions et sans superplastifiant). Ces valeurs sont limitées dans un domaine variant entre 1.1 et 4.71 %.

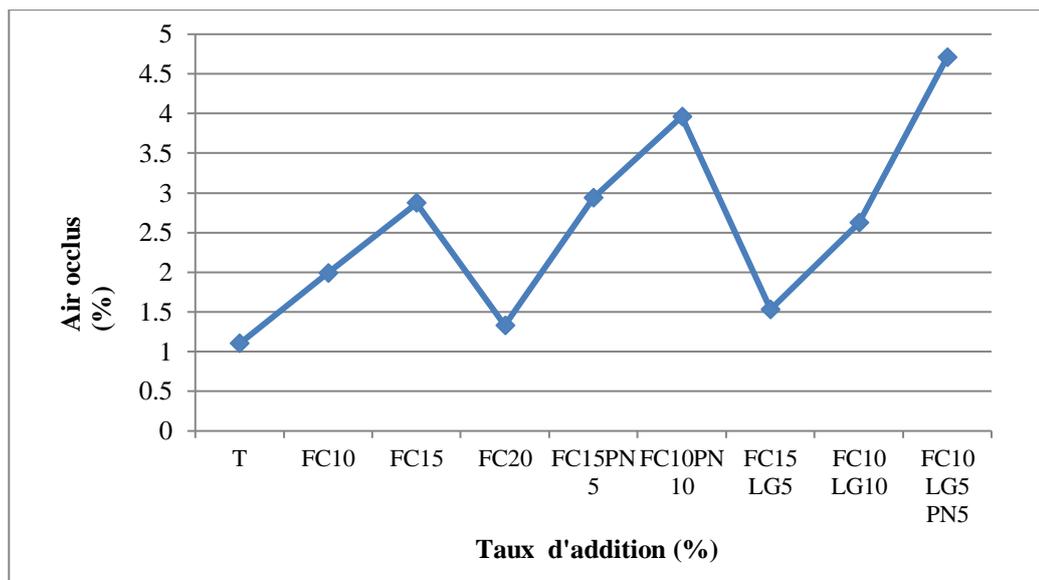


Figure IV.14 : Variation de l’air occlus du béton témoin par rapport au bétons avec additions et superplastifiant.

Probablement, les causes à l'origine de ce comportement sont : un effet granulaire défavorable résultant des frictions interparticules et la formation des congglomérats par les additions ainsi que le faible taux de superplastifiant utilisé qui n'arrive pas à defloculer totalement les grains des liants ainsi que d'autres facteurs tels que le temps de malaxage, le serrage ,...etc.

IV.2.3.2. Propriétés à l'état durci

Les résistances mécaniques à la compression de tous les bétons formulés ont été mesurées à 7 et 28 jours. Les valeurs de résistance à la compression ainsi obtenues sont représentées en fonction du taux de fines sur la figure IV.15 pour les bétons courants et sur la figure IV.16 pour les bétons à superplastifiant. Ces valeurs sont la moyenne de trois mesures.

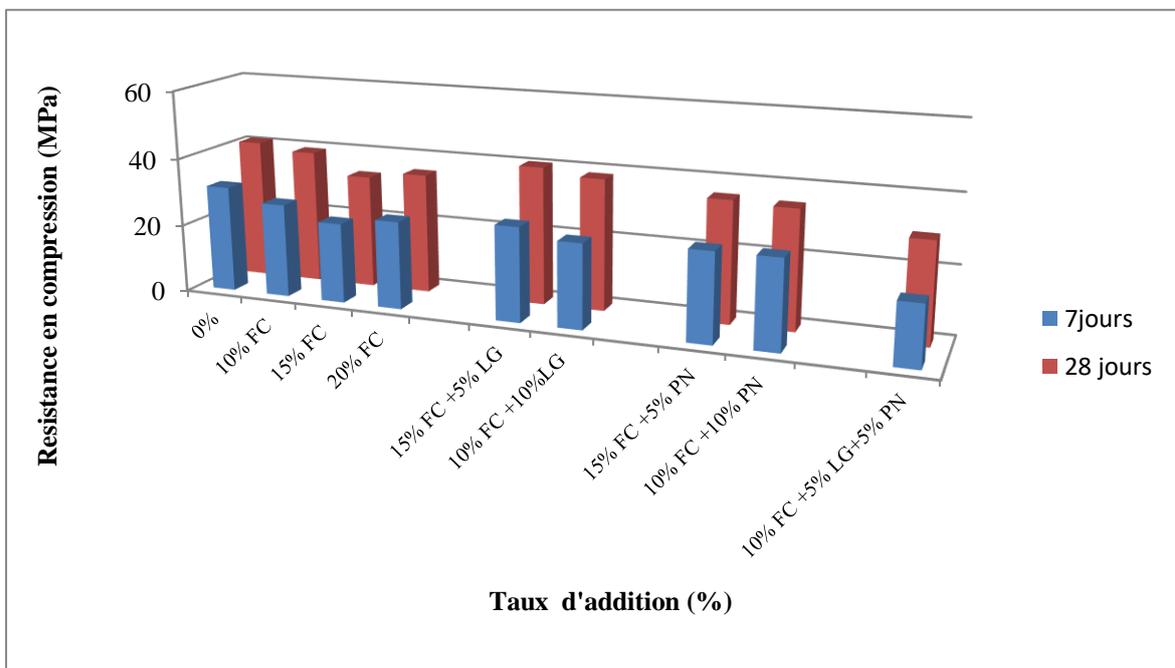


Figure IV.15 : Résistance à la compression des bétons courants.

a/ Résistances en compression à 07 jours des bétons avec additions sans adjuvant

➤ Effet de type d'ajout

• Filler Calcaire

La résistance des bétons renfermant le filler de calcaire est inférieure à celle du béton conventionnel de 11.9%, 24.83% et 17.7% respectivement. Cette diminution de la résistance à la compression est le résultat du retard dans la réaction d'hydratation.

- **Couple calcaire /pouzzolane naturelle**

La résistance du béton contenant simultanément 10% de la fillers de calcaire et 10% de la pouzzolane naturelle s'éloigne de 16.58% de la valeur du béton de référence et pour le mélange renfermant 15% de FC et 5% de PN, la résistance se trouve diminué de 16.61%. L'effet de remplissage est prédominant.

- **Couple calcaire / laitier granulé**

L'incorporation de laitier granulé dans le béton contenant du calcaire a fait diminuer la résistance à la compression de 11.62 % (FC₁₅ LG₅) et 20.87 % (FC₁₀ LG₁₀) respectivement par rapport au béton témoin.

Donc l'addition d'un laitier moins réactif que le ciment réduit la quantité d'ettringite formée au jeune âge d'hydratation [140].

- **Combinaison Calcaire /pouzzolane naturelle / laitier granulé**

Pour le mélange contenant simultanément 10% de FC, 5% de pouzzolane naturelle et 5% de laitier granulé, les pertes de résistance sont de l'ordre de 43.7% par rapport à celle du béton control. La combinaison en question présente un effet des additions défavorable.

La faiblesse de résistance à la compression des mélanges contenant le laitier granulé ou la pouzzolane naturelle peut être attribué à la contribution des fillers de calcaire à retarder l'hydratation d'une part et à la réaction pouzzolanique tardive des additions d'autre part.

b/ Resistances en compression a 28 jours des bétons avec additions sans adjuvant

- **Effet de type d'ajout**

- **Filler Calcaire**

Les résultats montrent que la perte de résistances des bétons au fillers de calcaire est de l'ordre de 4.37% (FC₁₀), 19%(FC₁₅) et 14.25%(FC₂₀) respectivement. La résistance est comparable à celle du béton témoin lorsque la quantité de remplacement de fillers est d'environ 10%. Cela peut être attribué à la réduction des volumes des pores cause de la contribution tardive du calcaire qui réagit avec les aluminates du ciment pour former des carboaluminates de calcium hydratés [141]. Lorsque le pourcentage de la poussière augmente, un effet défavorable sur la résistance à la compression devient prononcé.

- **Couple calcaire /pouzzolane naturelle**

L'ajout de 5% et 10% de pouzzolane naturelle dans les bétons renfermant le filler calcaire a fait diminuer la résistance de 13% (FC₁₅NP₅) et 15.73% (FC₁₀ NP₁₀) par rapport au béton conventionnel. Il est nettement clair que l'introduction de la pouzzolane n'a apporté aucune amélioration par rapport au béton témoin. Ce phénomène s'explique par l'activité lente de la réaction pouzzolanique.

- **Couple calcaire / laitier granulé**

L'introduction 10% de laitier granulé dans les bétons renfermant 10% de calcaire a donné une résistance comparable à celle du béton au calcaire mais reste inférieure à celle du béton control. Cependant l'introduction de 5% laitier granulé dans le béton contenant 15% de calcaire a conduit à une résistance comparable à celle du béton de référence. Ceci s'explique par l'activité hydraulique qui s'est déclenché. En effet l'excès de chaux active l'hydratation du laitier avec une texture C-S-H semblable à celle des ciments ; il en résulte alors des silicates de calcium hydraté et des aluminates tétracalciques hydratés de 2^{ème} génération qui possèdent en pouvoir de résistance similaire à celui des hydrates de ciment ordinaire [142]. Néanmoins, il ya lieu de signaler que cette amélioration induite par le laitier granulé est notamment faible à cause du faible pouvoir hydraulique du laitier d'El Hadjar.

- **Combinaison Calcaire /pouzzolane naturelle / laitier granulé**

Pour la variante FC₁₀ LG₅ PN₅, il y a une chute de résistance de l'ordre de 28.33 % par rapport à celle du béton à 10% FC. Donc l'ajout simultané de 5% de pouzzolane naturelle et 5% de laitier de haut fourneau dans le béton a un effet néfaste sur la résistance à la compression.

- **Variation de la résistance mécanique en fonction du temps et du type de ciment**

D'après les figures IV.16, pour tous les bétons, on remarque que les résistances en compression augmentent progressivement avec l'âge de conservation dans l'eau et les valeurs obtenues au jeune âge représentent presque 70% de la résistance à 28 jours.

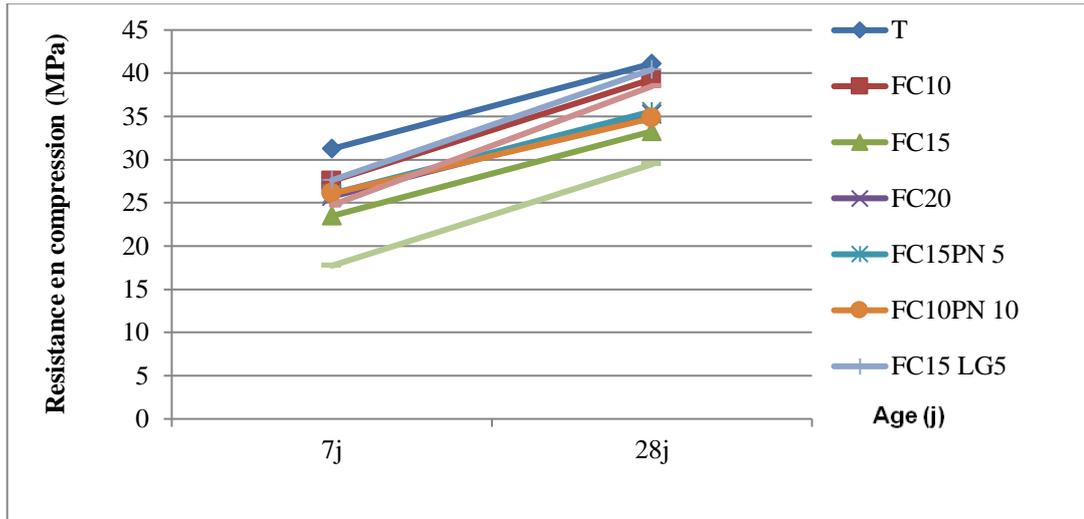


Figure IV.16 : Variation de la résistance des bétons courants en fonction de l'âge

Ce qui peut s'expliquer par le développement du phénomène d'hydratation du ciment en fonction du temps.

c/ Résistances en compression a 07 jours des bétons avec additions et superplastifiant

La figure IV.17 montre la variation de la résistance à la compression en fonction du taux d'additions des bétons confectionnés avec un rapport E/L égal 0.55 + 0.5 % de superplastifiant à base de carboxylates.

On constate qu'une meilleure résistance est obtenue pour les mélanges superplastifiés à tous les âges comparativement aux bétons courants.

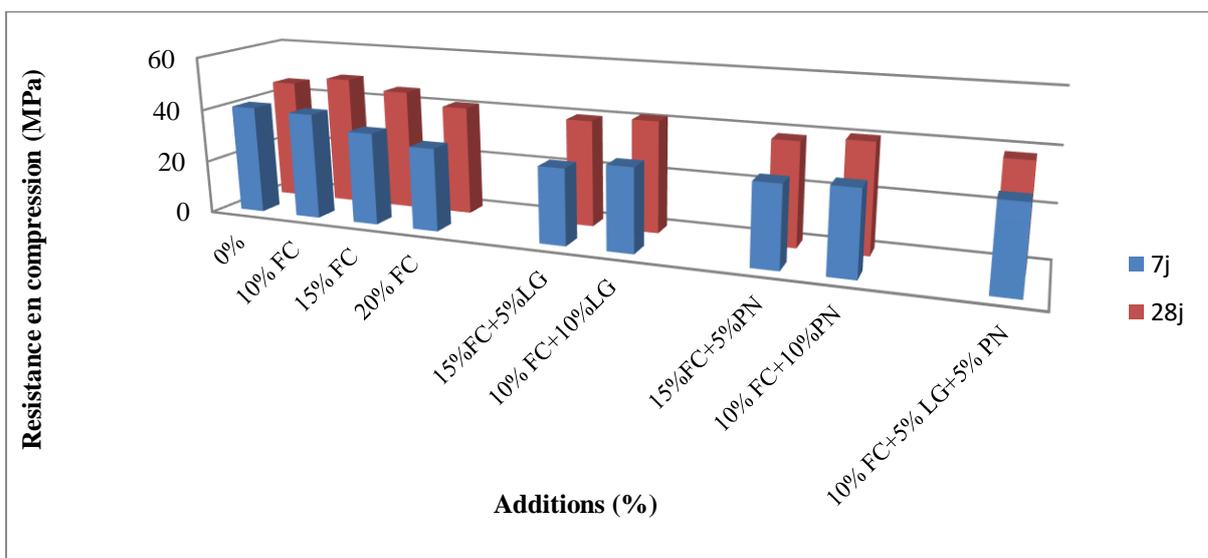


Figure IV.17 : Résistance à la compression des bétons à superplastifiant.

➤ **Effet de type d'ajout**

• **Filler Calcaire**

Les résistances des mélanges contenant le filler de calcaire seulement s'éloignent de 1.87% (FC₁₀), 14.89% (FC₁₅) et 23.6% (FC₂₀) par rapport au béton témoin. Ce résultat permet de justifier l'activité de du superplastifiant à favoriser l'hydratation du liant et à améliorer la microstructure. Donc il y a une meilleure compatibilité du superplastifiant avec ce type de liant. Ce qui est accord avec les résultats de puertas et al [28] qui ont affirmé que l'utilisation de superplastifiant à base de carboxylates à des faibles concentrations améliore la résistance à la compression en diminuant la porosité de la pate formulé à base de ciment au calcaire .

• **Combinaison d'addition d'additions**

Tous les mélanges renfermant des additions combinées présentent des résistances équivalentes à celles du béton à 20% de fillers de calcaire. Ceci nous mène à confirmer que les additions minérales contribuent aux résistances mécaniques au jeune âge par un effet physique [143].

d/ Résistances en compression a 28 jours des bétons avec additions et superplastifiant

➤ **Effet de type d'ajout**

• **Filler Calcaire**

La résistance du béton à 10% de FC est supérieure à celle du béton contrôle de 6.12% . Au-delà il ya une chutes de la résistance de l'ordre de 0.76 % et 10.32% respectivement pour les mélanges à 15% et 20% d'addition de FC.

Donc les molécules de superplastifiant dispersent non seulement des particules de ciment, mais sont impliqués dans l'hydratation, ce qui conduit à des modifications de la morphologie des hydrates.

• **Combinaison d'additions**

L'introduction du superplastifiant n'a pas influencé les résistances des bétons renfermant la pouzzolane ou / et le laitier de hauts fourneaux, leurs résistances demeurent inférieures à celles du béton témoin mais comparables à celle du béton à 20% de calcaire. Ceci se traduit par le fait que la demande en adjuvant est plus importante pour les bétons avec additions combinées. Ceci est probablement dû à l'irrégularité et l'aspect poreux des particules de laitier et la grande finesse de la pouzzolane naturelle.

➤ **Variation de la résistance mécanique en fonction de l'âge des bétons superplastifiés**

On remarque sur la figure IV.18 que, pour tous les bétons les résistances à la compression augmentent avec des taux variables d'un mélange à autre.

Ceci est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment et de la réaction des additions utilisées combinée à l'effet du superplastifiant.

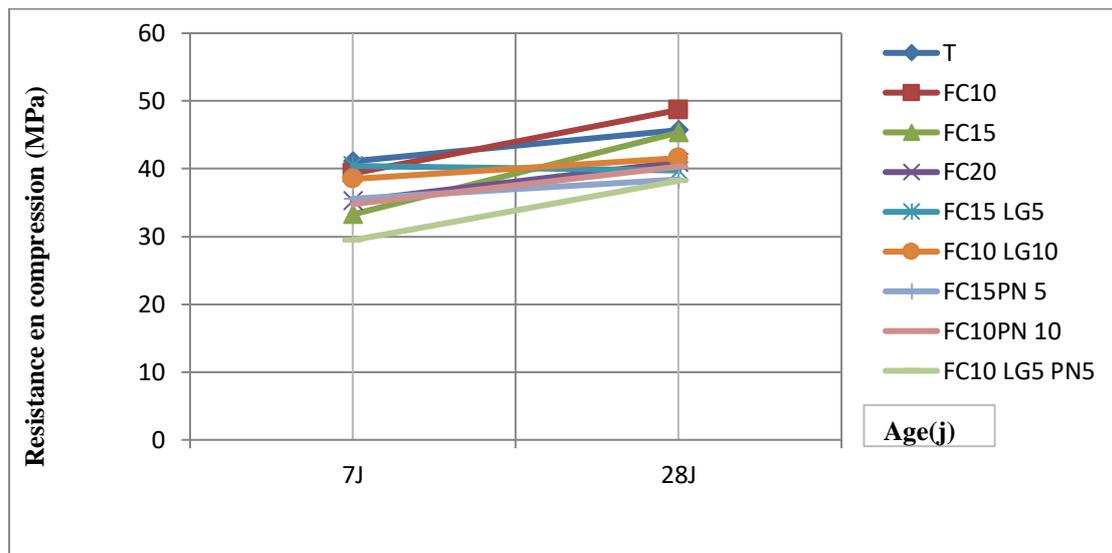


Figure IV.18 : Variation de la résistance mécanique en fonction de l'âge des bétons superplastifiés

e/ Apport des additions et du superplastifiant au béton témoin T

L'apport des additions et du superplastifiant aux résistances en compression à 07 jours et 28 jours, peut être évalué en analysant la variation des résistances en compression des bétons avec additions et superplastifiant par rapport au béton de référence sans superplastifiant et sans additions.

D'une manière générale, la figure IV.19, confirme l'apport positif de l'action combinée des additions minérales et du superplastifiant sur les résistances en compression à 07 jours et 28 jours, à faibles taux de substitution du ciment.

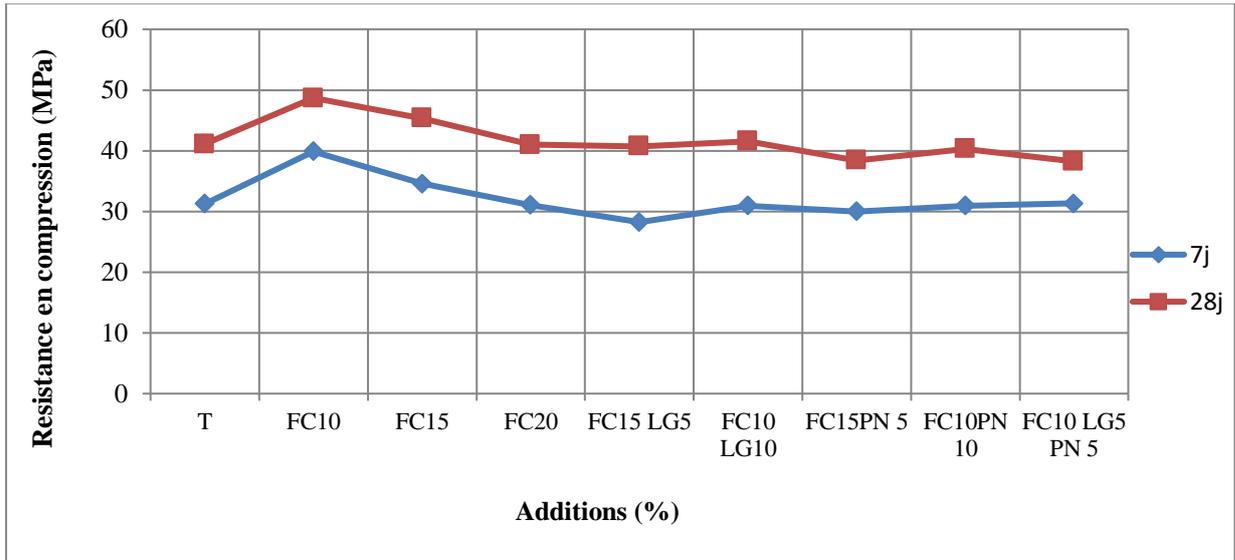


Figure IV.19 : Apport des additions et du superplastifiant au béton témoin.

- **Résistances en compression à 07 jours**

Pour les bétons avec additions calcaires, l'apport aux résistances en compression est maximal à 10 % du taux de substitution du ciment par le filler calcaire et reste favorable jusqu'à 15 % du taux de substitution du ciment.

L'apport des additions de pouzzolanes et filler calcaire aux résistances en compression à 07 jours est favorable. Les résistances sont comparables à la résistance du béton témoin.

Pour les bétons avec additions de laitier granulé, l'apport aux résistances en compression est favorable pour FC₁₀LG₁₀. Néanmoins, il est défavorable pour FC₁₅LG₅.

La dernière combinaison FC₁₀LG₅PN₅ présente une résistance équivalente à celle du béton témoin. Donc, l'apport est favorable.

Nous pouvons donc confirmer que l'action combinée des additions minérales et des superplastifiants sur les résistances en compression à 07 jours, est très favorable à faibles taux de substitution du ciment par le filler calcaire.

- **Résistances en compression a 28 jours**

L'apport des additions calcaires aux résistances en compression à 28 jours est très favorable. L'ajout du superplastifiant permet d'obtenir des résistances supérieures à celle du béton sans

additions, jusqu'à 15 % du taux de substitution du ciment. En effet, le gain de résistance en compression à 28 jours est maximal pour les bétons avec additions calcaires et superplastifiant.

Pour les bétons avec additions de pouzzolanes et filler calcaire, l'apport aux résistances en compression est favorable pour le mélange incorporant 10% FC et 10% PN.

Pour les bétons avec additions de laitier granulé et filler calcaire, l'apport aux résistances en compression à 28 jours est favorable pour le mélange à 10% FC et 10% LG.

Dans le cas de la combinaison 10% FC +5% LG+5% PN, la résistance en compression diminue de 7,51% par rapport au béton témoin sans additions et sans adjuvant.

Nous pouvons donc confirmer que l'action combinée des additions minérales et du superplastifiant est favorable sur les résistances en compression à 28 jours pour les combinaisons sus-citées.

Donc, l'utilisation du superplastifiant et des additions ont permis d'améliorer la résistance en compression du béton de référence sans additions et sans adjuvant.

IV.3. Influence de l'incorporation combinée des fillers calcaire ou poussière du four CKD, poudre de verre sur les propriétés des bétons autoplaçants.

IV.3.1. Caractérisation des BAP à l'état frais

IV.3.1.1. Étalement au cône d'Abrams (Slump flow)

Nous pouvons constater sur la figure IV.20 que l'ensemble des bétons autoplaçants respectent le critère d'étalement. L'étalement spécifié est respectivement compris entre 73 cm (BAP1) et 74.5 Cm (BAP4). De plus, les BAP testés ont eu des comportements différents.

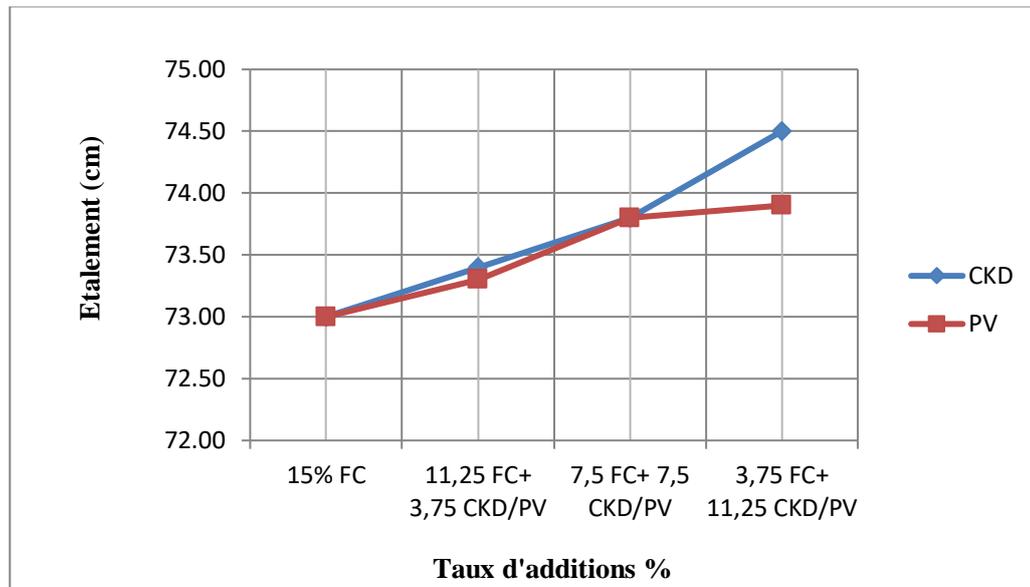


Figure IV.20: Influence du dosage en addition combinée sur l'étalement des BAP.

L'incorporation de la poussière du four de la cimenterie CKD dans les mélanges améliore l'étalement du BAP témoin. À titre indicatif, l'étalement après malaxage 73 cm (BAP témoin), 73.4 (BAP2), 73.8 (BAP 3) et 74.5 (BAP 4).

Ces résultats montrent que l'utilisation de CKD a un effet bénéfique sur l'étalement des BAP confectionnés. L'introduction conjuguée de cette addition et du filler calcaire a conduit à augmenter l'étalement de tous les BAPs. Cette contribution de la part du CKD dépend de deux composantes: une composante physico- chimique et une composante granulaire liée aux frottements des particules. En effet, l'augmentation du volume de pâte par l'introduction du CKD a entraîné la réduction des frottements des granulats par leur dispersion en améliorant l'écoulement des BAP.

L'influence de la poudre de verre sur l'étalement des bétons autoplaçants contenant le filler calcaire comme addition, est pratiquement similaire au comportement révélé pour le CKD.

Les valeurs de l'étalement sont presque semblables : 73.3 (BAP 5), 73.8 (BAP 6) et 73.9 (BAP 7). Ceci s'explique par le fait que les fines particules s'insèrent dans les vides et libèrent l'eau emprisonnée dans ces vides, ce qui améliore l'ouvrabilité de la matrice.

Il est à noter, aussi que pour tous les BAPs, l'auréole de laitance à la périphérie des galettes était très faible voire absent (de 0.5 à 1 mm) suite à la bonne répartition des granulats et l'hydratation du ciment au jeune âge. 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.

IV.3.1.2 Le remplissage (L –box)

Les résultats obtenus par l'essai L – Box, sont présentés sur la figure IV.21. La valeur du taux de remplissage ($H2 / H1$) doit être entre 0, 8 et 1 pour éviter le risque de blocage.

D'après les valeurs obtenues, on remarque que Tous les BAP donnent des taux de remplissage qui s'inscrivent dans le domaine des BAP ($H2/H1 > 0,8$).

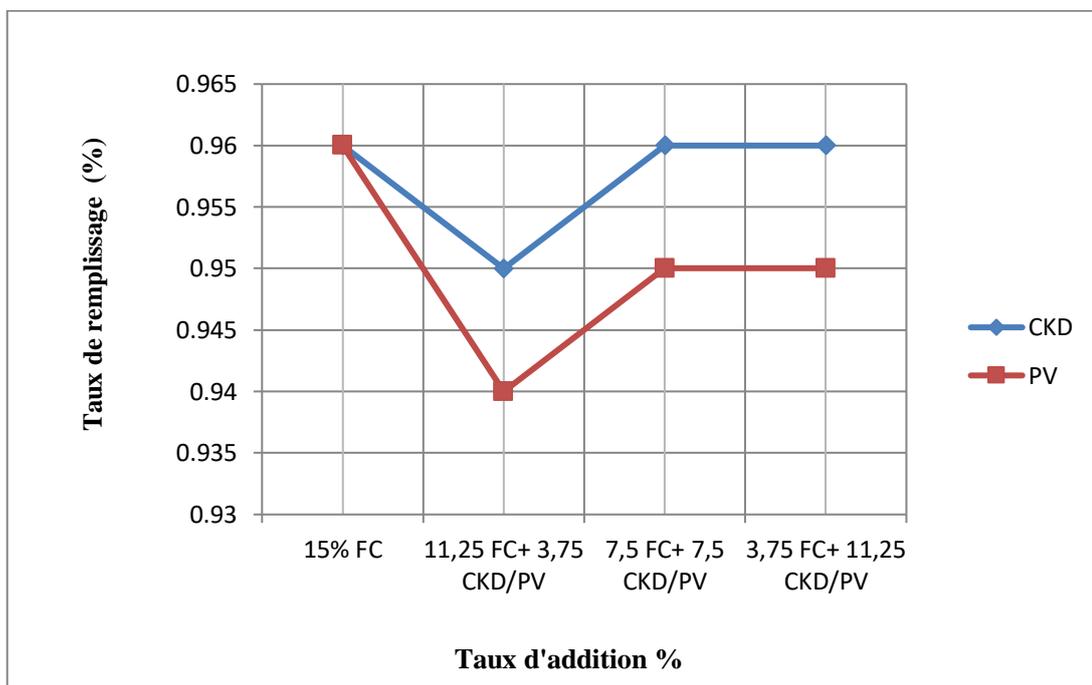


Figure IV.21: Influence du dosage des additions combinées sur l'écoulement.

À travers ces résultats, nous pouvons noter que l'introduction de la CKD à des taux de 7.5% et 11.25 % dans les BAP témoin n'affecte pas la capacité de remplissage et de passage contrairement à un dosage de 3.75% qui diminue cette capacité.

Concernant les BAPs renfermant le filler calcaire et la poudre de verre, on constate une légère diminution du taux de remplissage pour les trois taux de substitution du calcaire par la poudre de verre.

Sur ce, aucun problème n'est à signaler puisque tous les BAPs présentent des taux de remplissage supérieurs à 0,80. À 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.

IV.3.1.3. Stabilité au tamis

Les résultats issus de l'essai de stabilité au tamis sont présentés sur la figure IV.22. Globalement, toutes les compositions testées ont une stabilité satisfaisante $5\% \leq IS \leq 15\%$.

Pour les BAPs à CKD et PV, on note sur la figure IV.22 que la stabilité diminue par augmentation du taux de substitution du filler calcaire par ces deux additions respectivement. L'ordre de classement des BAPs est le suivant : BAP1, BAP 5, BAP 6, BAP2, BAP3, BAP 4 et BAP 7.

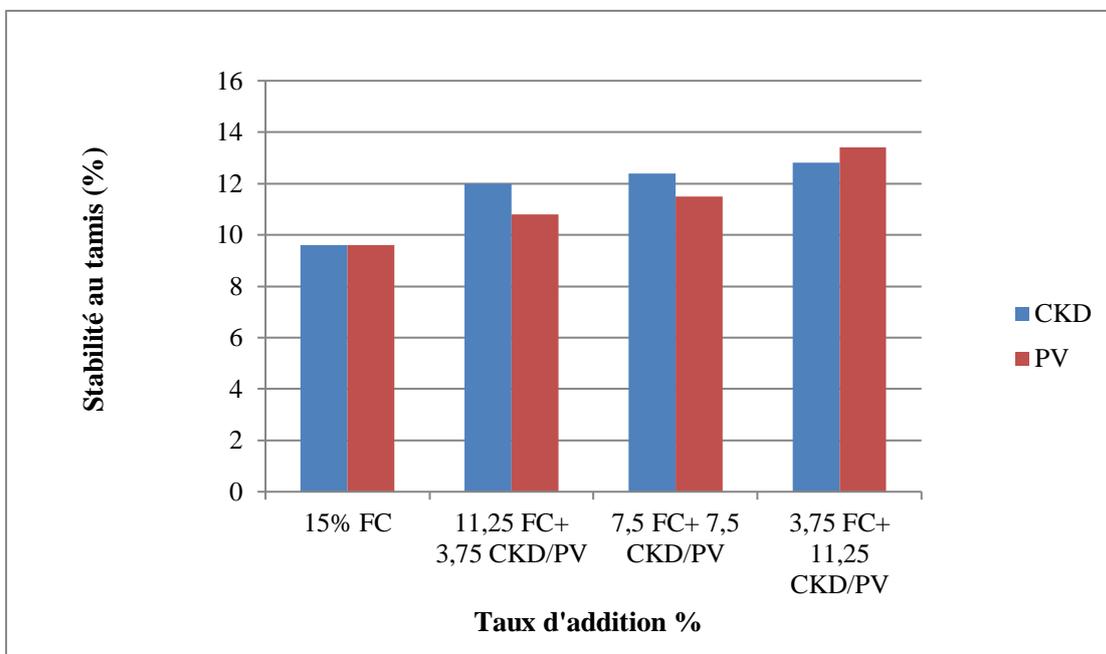


Figure IV.22: Influence du dosage en addition sur la stabilité au tamis.

Le mortier devient visqueux pour s'écouler à travers le tamis. Donc, l'augmentation du taux d'ajout conduit à décroître la stabilité au tamis des mélanges confectionnés.

IV.3.2. Caractérisation des BAP à l'état durci

Les additions minérales améliorent les résistances mécaniques au jeune âge par effet physique (remplissage). Lorsqu'elles sont réactives, elles améliorent les résistances à plus longues échéances par effet chimique (hydraulique ou pouzzolanique) [144]. Cette amélioration des

résistances dépend de la nature, de la finesse et du dosage de l'addition.

IV.3.2.1. Résistance à la compression

L'examen du développement des résistances à la compression des différents bétons étudiés nous a permis de formuler les remarques suivantes :

a/ Résistance à la compression des BAP contenant la combinaison FC+CKD

➤ Variation en fonction du taux de substitution

La figure IV.23 présente les résistances en compression obtenues pour les formules de béton contenant différents taux de filler calcaire et de la poussière du four de la cimenterie.

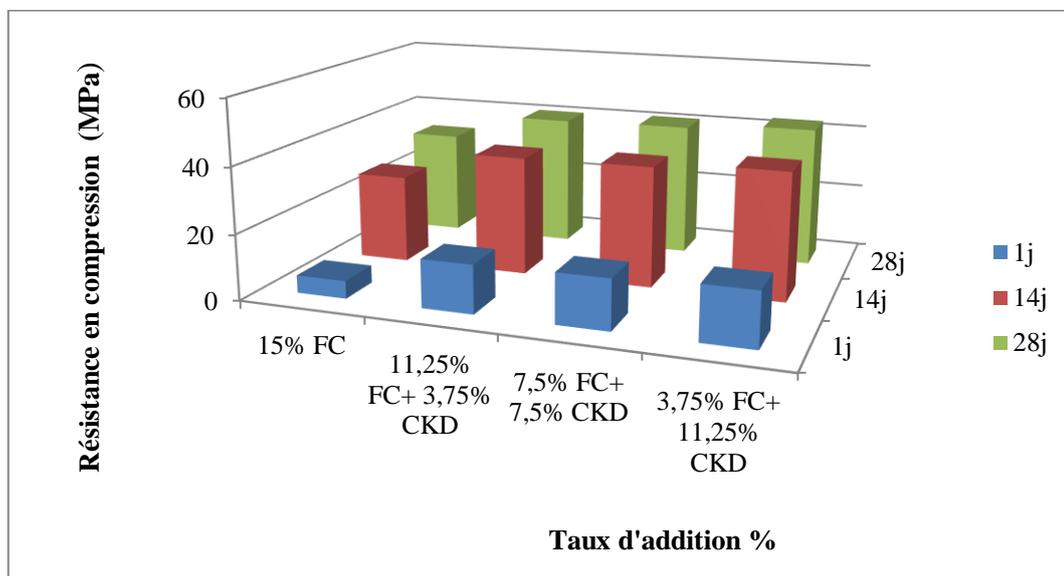


Figure IV.23: Effet de l'addition combinée des FC+ CKD sur la résistance en compression.

Après 24 heures, On remarque que, la résistance du BAP témoin est de l'ordre de 5.4 Mpa. Cependant les résistances initiales en compression pour les bétons à 3.75%, 7.5% et 11.25% de CKD en remplacement du filler calcaire sont nettement supérieures à la résistance développée par la formule de référence avec ciment Portland et filler calcaire. Ces compositions ont montré une amélioration spectaculaire de toutes les valeurs mais cette variation est différente d'un béton à un autre. En fait, les valeurs de la progression sont : 172,59 %, 182,04 % et 205,37% successivement. Cette constatation peut être expliquée par l'effet de la composition chimique du CKD riche en (CaO) qui augmente la quantité

du C_3S dans les mélanges confectionnés et accélèrent l'hydratation du clinker de ciment (en particulier C_3S) et par conséquent augmenter les valeurs de résistance à la compression aux jeunes âges. L'effet de la finesse est négligeable étant donné que le CKD, le ciment et le filler calcaire ont des surfaces spécifiques comparables.

À 14 jours, pour les BAP avec FC+CKD, nous observons des valeurs de résistance très proches. L'écart observé par rapport au BAP de référence au jeune âge se réduit. La différence de résistance entre la composition sans et avec CKD varie en fonction du type de la combinaison. Elle est de l'ordre de 34.61% (BAP2), 36.56% (BAP3) et 43.65% (BAP4). Ceci est dû au ralentissement de la réaction d'hydratation dans les mélanges renfermant différents taux de CKD en substitution partielle du filler calcaire du ciment.

À 28 jours, on note que le BAP1 (de référence) présente la valeur de résistance la plus basse avec 32.5 MPa. Par ailleurs la valeur maximale est obtenue dans le BAP4. On constate aussi que l'écart entre les valeurs de résistance en compression des compositions avec CKD augmente. Il passe de 1 MPa (BAP2) à 3 MPa (BAP4) successivement par rapport au BAP2. Néanmoins, elles restent supérieures à celle du BAP témoin. Ceci s'explique par le fait que la silice (SiO_2) présente dans la composition du CKD à un pourcentage de 20,19% contribue à améliorer la résistance en compression à cet échéancier. Au début de l'hydratation, ce composant est inactif, mais au cours du temps, il 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 [145].

➤ Variation en fonction de l'âge

Sur la figure IV.24, nous observons que le développement de la résistance du BAP témoin durant la période de 1 à 14 jours est le plus faible.

La résistance initiale passe de 5.4 MPa à une valeur de 27,1 MPa. Cependant, cette évolution devient de l'ordre de 21,76 MPa (BAP 2); 21,77 MPa (BAP 3) et 22,44 MPa (BAP 4). Ceci signifie que la substitution du filler calcaire par des taux variables du CKD améliore la réaction d'hydratation à jeune âge.

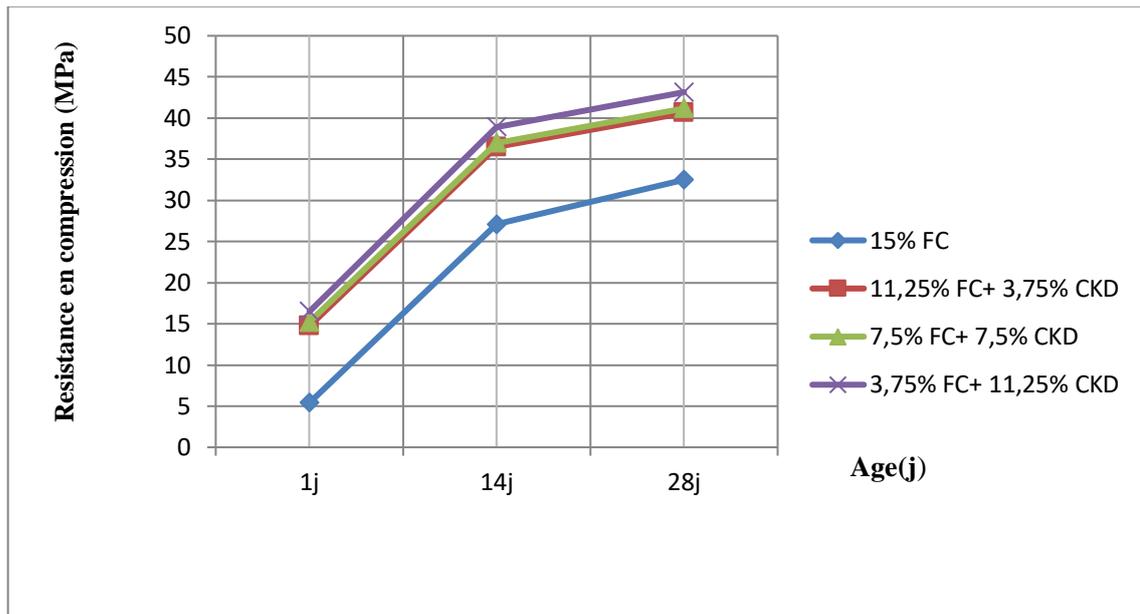


Figure IV.24 : Effet de l'addition combinée des FC+ CKD sur la résistance en compression en fonction de l'âge.

Au-delà du quatorzième jour, les résistances enregistrées à 28 jours démontrent que la cinétique d'hydratation devient plus lente. La diminution de la résistance à la compression du BAP2 est de l'ordre de 1,26 MPa par rapport au BAP1. Alors qu'elle se converge pour le BAP2 et le BAP3 pour des valeurs de 1,23 MPa et 1,18 MPa successivement.

Donc, l'effet accélérateur induit par le CKD tend à disparaître et probablement les mélanges à FC et CKD demandent plus d'eau pour que la réaction d'hydratation se déroule normalement.

b/ Résistance à la compression des BAP contenant la combinaison FC+ PV

➤ Variation en fonction du taux de substitution

Les résultats de la deuxième série d'essais sont représentés sur la figure IV.25. Il est noté un gain de résistance remarquable des BAP avec addition de poudre de verre, à tous les âges de durcissement. La résistance en compression augmente avec l'augmentation du taux de substitution.

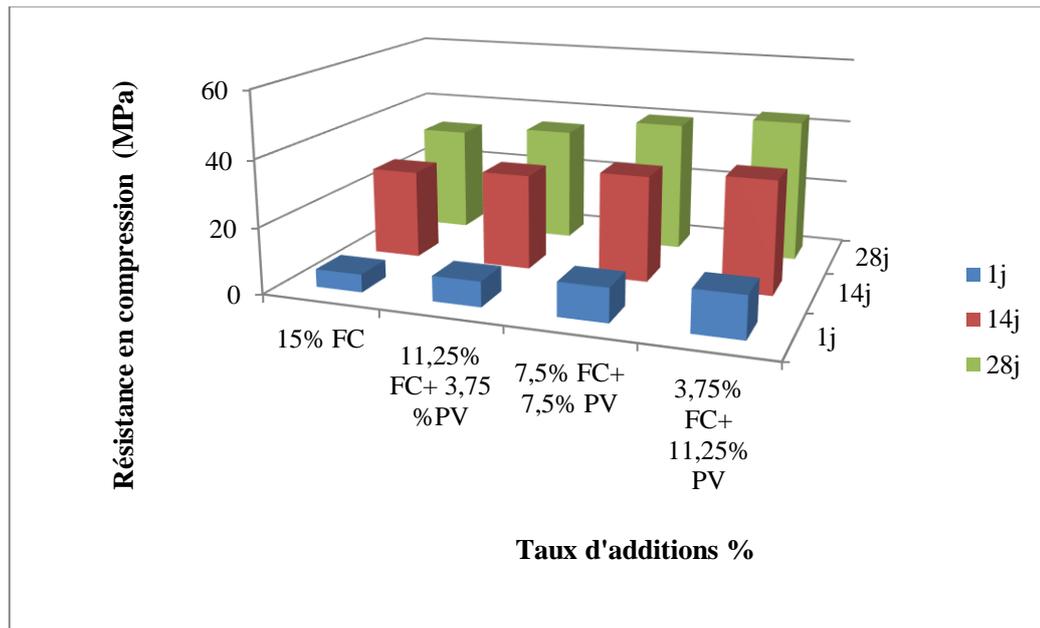


Figure IV.25 : Effet de la poudre de verre sur la résistance en compression.

En effet, à très jeune âge, l'augmentation de la résistance est de l'ordre de 40,47% (BAP5) ; 88,89% (BAP 6) et 133,33% (BAP 7) par rapport au BAP1.

A 14 jours, ces améliorations deviennent moins importantes. Les valeurs sont : 7,75% (BAP 5) ; 18,45% (BAP 6) et 26,57% (BAP 7).

A 28 jours, à une teneur de 11.25 % de PV, la résistance atteint une valeur maximale de 43.5 MPa. Les deux BAPs : BAP5 et BAP6 manifestent des résistances moins importantes que celle présentée par le BAP7. Elles sont de l'ordre de 35.15 MPa et 40.08 MPa respectivement et elles demeurent notablement supérieures à celle du BAP témoin.

Ces constatations s'expliquent par le fait que la poudre de verre ajuste la granulométrie du ciment, en augmentant ainsi la compacité de la pâte (effet physique). Aussi, selon Soroushian et al, [146] 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 (15,76%).

Le développement des résistances à 28 jours est dû à l'augmentation du taux de la silice dans les BAPs à combinaisons d'additions.

➤ **Variation en fonction de l'âge**

À partir des résultats obtenus et présentés sur la figure IV.26, nous remarquons, pour tous les bétons, une augmentation évolutive de la résistance à la compression avec l'âge du béton et aucune chute n'est enregistrée. Ainsi, on observe que les bétons étudiés présentent des résistances en compression acceptables aux jeunes âges et ils présentent des performances mécaniques satisfaisantes en compression à l'âge mature. L'évolution de la réaction d'hydratation est constante durant la période de 1 à 14 jours. Elle est d'environ 21,7 MPA.

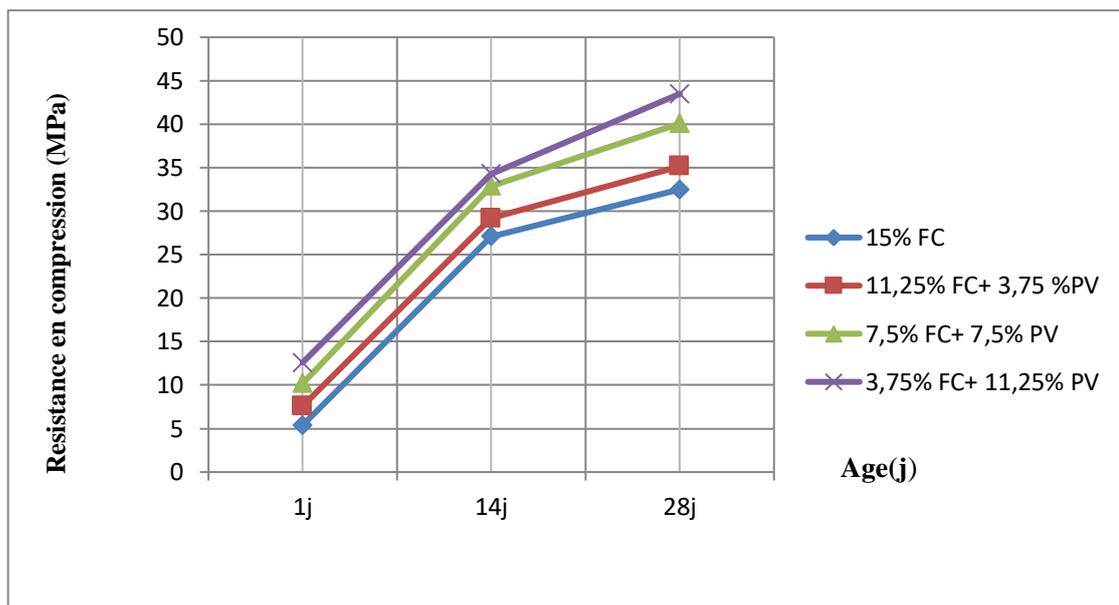


Figure IV.26 : Effet de la poudre de verre sur la résistance en compression en fonction de l'âge

Ce gain de résistance pourrait s'expliquer par une amélioration de la microstructure des produits hydratation, une réduction de la taille des pores suite à l'augmentation des produits d'hydratation.

Comme la PV est un matériau pouzzolanique, on peut supposer que la faible valeur de la résistance à jeune âge est, comme pour tous les autres ajouts cimentaires, due à la lenteur de réaction pouzzolanique [147].

Au-delà de 14 jours, la progression de la résistance devient variable d'un béton à autre. Elle est de 5.95 MPa (BAP5), 7.98 MPa (BAP6) et 9.2 MPa (BAP7) successivement. On peut attribuer cette augmentation à la poudre de verre qui n'absorbe pas l'eau de gâchage, ce qui

augmente la quantité de l'eau libre dans la matrice cimentaire, et par conséquent contribue au développement du phénomène d'hydratation du ciment en fonction du temps.

IV.3.2.2. Résistance à la traction par flexion

a/ Variation de résistance en fonction du taux d'addition

➤ Couple calcaire/CKD

La figure IV.27 représente l'évolution la résistance à la traction des BAP à CKD en fonction du taux de substitution.

On constate que l'augmentation du dosage en CKD dans les BAP à filler calcaire entraîne une amélioration des résistances en flexion de tous les mélanges. En effet, à 1 jour, l'incorporation du CKD entraîne une amélioration sensible de la résistance. Elle varie de 116,18%, 130,88%, 142,65% pour les mélanges à PAB2, PAB3 et BAP 4 successivement par rapport au BAP témoin.

À moyen âge, cette progression de résistance tend à chuter. Elle varie entre 12,29% (PAB2) ; 23,89% (PAB3) et 31,74% (PAB4) respectivement comparativement au béton control.

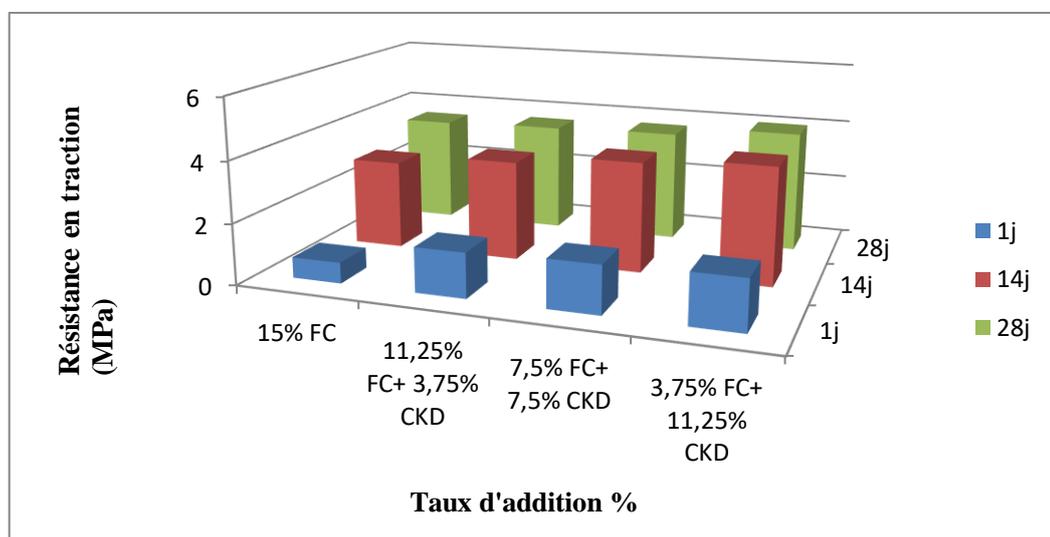


Figure IV.27 : Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de FC et CKD

A 28 jours, l'intervalle de variation des valeurs de la résistance en flexion des BAP est très serré 8,22% (BAP 2), 15,01% (BAP 3) et 20,68%(BAP 4).

Le mélange contenant comme addition 11,75% de CKD et 3.25% de FC présente les

meilleures résistances à tous les échéanciers.

Donc , l'incorporation du CKD dans le BAP control a permis d'améliorer l'adhérence entre le ciment et le sable.

➤ Couple calcaire/verre

Les résultats expérimentaux obtenus figure IV.28 présentent l'effet de la teneur en poudre de verre sur la résistance en flexion des BAP.

On constate une modeste augmentation de la résistance en flexion en substituant la poudre de verre au filler calcaire.

À titre indicatif, les pourcentages sont : 16,18% (BAP 5) ; 44,12% (BAP 6) et 88,24%(BAP 7) respectivement pour l'échéancier d'un jour.

À 14 jours, le développement des résistances est très léger. Par rapport au BAP1, il passe de 2,73% pour (BAP 5) à 6,14% (BAP 6) et enfin 18,09%(BAP 7).

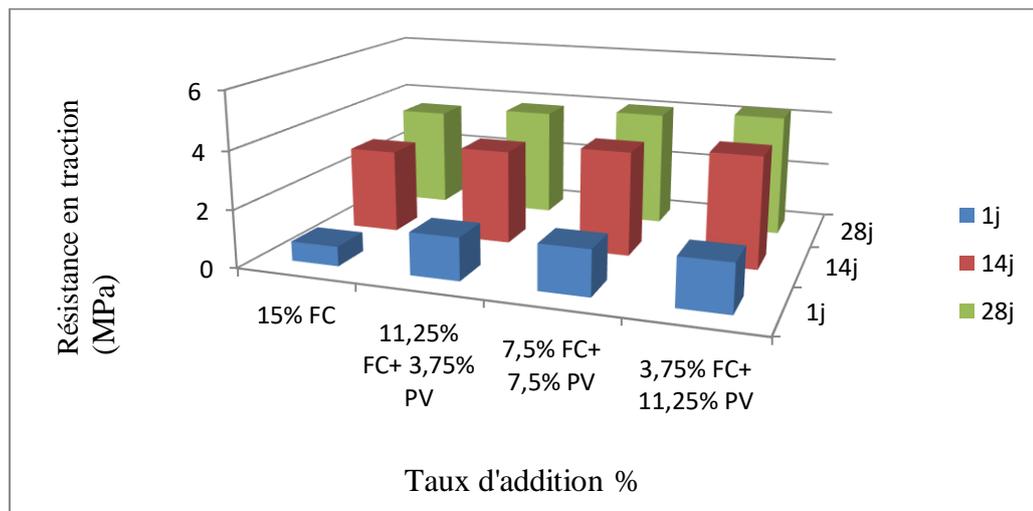


Figure IV.28 : Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de FC et PV

À 28 jours, l'amélioration des résistances est la plus faible comparativement aux deux échéanciers. Elle est de l'ordre de 2,55% (BAP 5) ; 4,82% (BAP 6) et 13,60% (BAP 7).

Les valeurs maximales sont obtenues dans le BAP (BAP 7) à tous les échéanciers.

Donc, on peut conclure que la poudre de verre peut contribuer à améliorer l'adhérence sable-ciment. Néanmoins, cette contribution est moins importante que celle développée par le CKD.

IV. Conclusion

Les résultats obtenus à partir de cette étude expérimentale, nous permettent de tirer les conclusions suivantes:

1^{ère} partie

- Le filler calcaire issu de la carrière Essafia peut être utilisée en remplacement partiel du ciment dans certaines gammes de résistance et de maniabilité exigées.
- Les ciments composés avec le filler se distinguent par une prise lente et un durcissement ralenti à sa période initial en comparaison avec un ciment sans ajouts.
- Le besoin en eau et le début et fin de prise augmentent avec l'addition de l'ajout.
- Les résultats d'analyse sur le mortier, montrent que la résistance mécanique avec l'ajout de filler calcaire et de laitier, filler calcaire et pouzzolane respectivement dans le CPA, engendre une diminution de la résistance mécanique par rapport au mortier témoin.
- La résistance à la compression des bétons ordinaires diminue avec l'augmentation du taux de fillers calcaire. Le mélange à 10% de FC donne des caractéristiques très proches de celles du béton témoin à 28 jours.
- L'incorporation progressive du laitier de hauts fourneaux dans les bétons courants renfermant les fillers de calcaire entraîne une diminution des résistances mécaniques à 07 jours. Toutefois, à l'âge de 28 jours, les bétons contenant 15% de fillers de calcaire et 5% de laitier à une finesse de $3200\text{cm}^2/\text{g}$ atteint une résistance comparable à celle du béton témoin.
- L'incorporation de la pouzzolane naturelle à une finesse de $5000\text{cm}^2/\text{g}$ dans les mélanges renfermant les fillers de calcaire n'a pas d'effets bénéfiques sur les propriétés des bétons ordinaires testés.
- Les essais d'affaissement sur bétons témoignent une ouvrabilité accrue avec un faible dosage en superplastifiant.

- Les bétons superplastifiés présentent des résistances à la compression élevée par rapport aux bétons non adjuvés du fait du rôle de superplastifiant dans la distribution des grains de ciment et l'amélioration de la compacité du béton.
- En ce qui concerne la résistance à la compression, l'ajout des fillers et du superplastifiant augmente considérablement cette résistance comparativement à celle du béton de référence sans additions et sans adjuvant.
- Le superplastifiant à base de polycarboxylate utilisé semble plus efficace en présence du calcaire et perd un peu de son efficacité avec la pouzzolane naturelle et le laitier granulé.

2^{ème} partie

- L'influence des additions minérales sur l'étalement des bétons est fonction de leur dosage et de leur nature chimique (inerte ou active). Le CKD conjugué au filler calcaire garantit les valeurs maximales de l'étalement par rapport au béton de référence.
- Pour la ségrégation dynamique caractérisée par l'essai L-Box, les résultats représentés obtenus sont conformes à ce que l'on peut attendre d'un béton auto-plaçant.
- Pour la ségrégation statique ou stabilité au tamis, les BAP présentent des taux de ségrégation inférieurs à 15%, synonyme d'une stabilité correcte.
- L'augmentation de la teneur en poudre de verre et la poussière de four de cimenterie dans les BAP à filler calcaire mène à une augmentation des résistances en compression des BAPs.
- Le mélange témoins à base de filler calcaire présente les plus faibles performances. Par contre, les deux mélanges les plus édufiants et les plus performants sont ceux de 3.75 FC 11.25 CKD et 3.75 FC 11.25 PV.

Conclusions générales

&

perspectives

Conclusions générales

L'utilisation de différentes additions minérales dans le béton a pour objectif de valoriser une catégorie de matériaux naturels ou coproduits industriels disponibles en Algérie. La poussière de calcaire issu de concassage des granulats pour béton peut engendrer de la part de sa finesse une pollution environnementale et esthétique. Son incorporation seule ou avec une autre addition dans le béton peut constituer une approche prometteuse pour régler ce problème. De très peu études se sont intéressées à l'utilisation de cette poussière de calcaire pour la fabrication des bétons hydrauliques et des bétons superplastifiés.

Afin de répondre aux objectifs visés par cette thèse, et évaluer d'une manière plus précise les effets que peuvent engendrer l'interaction ciment – polyaddition – superplastifiant sur les propriétés des bétons, nous avons proposé d'utiliser une méthodologie spécifique qui est basée en premier lieu sur la substitution massique progressive du filler calcaire par des combinaisons d'additions minérales normalisées dans des pâtes, des mortiers et enfin des bétons. En second lieu, une substitution volumique du filler calcaire contenu dans la composition du béton autoplaçant par des fillers issus des déchets.

A la lumière des essais réalisés, on peut affirmer que l'utilisation du ciment pré mélangé au filler calcaire est un excellent moyen pour diminuer les émissions de dioxyde de carbone CO₂, améliorer les résistances en compression et même la consistance du mélange frais (les pâtes deviennent plus fluides).

Les principaux résultats obtenus dans cette étude peuvent se résumer comme suit :

Partie 1 :

- La demande en eau du filler calcaire est plus importante que celle du ciment. Un mauvais arrangement granulaire est à l'origine de ce comportement
- Le filler calcaire joue le rôle de retardateur de la vitesse du processus d'hydratation.
- Les résistances en compression des mortiers au filler calcaire seul diminuent directement sans aucune amélioration et descendent au-dessous de la résistance du mortier de référence.

- un pourcentage de 5 % de filler calcaire permet d'aboutir à des résistances proches du ciment CPA. Au-delà de ce pourcentage, son effet est néfaste.
- Le besoin en eau des pâtes avec combinaisons d'additions minérales varie sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (finesse) et la quantité de l'addition incorporée dans les mélanges.
- Les combinaisons élaborées retardent le temps de prise par rapport à ceux du ciment de référence.
- Les résistances en compression des mortiers à combinaisons d'additions demeurent inférieures à celle du mortier témoin. Aucun gain de résistance.
- Les masses volumiques des bétons ordinaires confectionnés varient entre 2318 kg/m³ pour le béton témoin et 2440 kg/m³ pour le mélange à 15%FC et 5% de PN .
- En présence de l'adjuvant, les masses volumiques diminuent à l'exception du mélange BFC₁₀ LG₅ PN 5. L'introduction du superplastifiant a corrigé l'arrangement total des particules dans la matrice cimentaire.
- La classe de consistance des bétons prés mélangés au FC est plastique. Cependant les bétons contenant les combinaisons d'additions sont fermes.
- L'introduction du superplastifiant à base de polycarboxylate au béton a permis d'aboutir à des bétons très ouvrables.
- L'air occlus dans les mélanges à base des additions est élevé. Probablement c'est le résultat de formation des agglomérats de particules à cause de la divergence de leurs formes et de leurs finesses ainsi que d'autres facteurs ainsi que d'autres facteurs.
- Le superplastifiant a permis de réorganiser les particules dans les mélanges et d'avoir un empilement des constituants corrects mais il semble que la quantité d'air occlus est indépendante du taux de substitution du ciment par les additions.
- La faiblesse des résistances à la compression des mélanges contenant le filler calcaire, le laitier granulé ou la pouzzolane naturelle à l'échéance de 7 jours peut

être attribué à la contribution des fillers de calcaire à retarder l'hydratation d'une part et à la réaction pouzzolanique tardive des additions d'autre part.

- l'introduction de 5% laitier granulé dans le béton contenant 15% de calcaire a conduit à une résistance comparable à celle du béton de référence. Ceci s'explique par l'activité hydraulique qui s'est déclenché.
- l'utilisation du superplastifiant et des additions dans les bétons a permis d'améliorer la résistance en compression du béton de référence. Ces améliorations dépendent de la nature des combinaisons élaborées. En substituant 20% FC ,10% FC +10% LG et 10% FC+10% PN par rapport à la masse totale du ciment, on obtient une résistance en compression à 28 jours comparable à celle d'un béton ordinaire. Ce qui permet également de réduire la teneur en ciment pour une résistance et un affaissement donnés. Cette caractéristique est très intéressante du point de vue économique, étant donné que le ciment est l'ingrédient le plus cher dans la composition du béton. Aussi, On peut observer qu'au bout de 28 jours, la résistance en compression à 10% et 15% du FC est supérieure à celle du béton ordinaire. Le filler calcaire joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20% environ, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 10%.

Partie 2 :

- Le BAP renfermant le CKD conjugué au filler calcaire garantit les valeurs maximales de l'étalement par rapport au béton de référence.
- Pour la ségrégation dynamique caractérisée par l'essai L-Box, les résultats représentés obtenus sont conformes à ce que l'on peut attendre d'un béton auto-plaçant.
- Pour la ségrégation statique ou stabilité au tamis, les BAP présentent des taux de ségrégation inférieurs à 15%, synonyme d'une stabilité correcte.
- Les bétons testés présentent des résistances acceptables et restent dans la gamme des bétons courants.
- L'augmentation de la teneur poussière de four de cimenterie dans les BAP à filler

calcaire mène à une augmentation des résistances mécaniques des BAPs. Au jeune âge, le CKD joue le rôle d'accélérateur du processus d'hydratation.

- La poudre de verre dans les BAP élaborés tend à améliorer les résistances mécaniques à tous les échéanciers. L'effet filler est prédominant. Néanmoins au jeune âge, le taux du Na_2O contribue de sa part à augmenter les résistances initiales.
- Le mélange témoin à base de filler calcaire présente les plus faibles performances. Par contre, les deux mélanges les plus édifiants et les plus performants sont ceux à 3.75 +FC 11.25 CKD et 3.75 +FC 11.25 PV.

Recommandations et perspectives

Les travaux effectués dans cette thèse ont considéré quelques paramètres qui influent sur les propriétés à l'état frais et sur les résistances mécaniques des mortiers et bétons. Ce domaine peut être approfondi et enrichi en procédant à:

- examens microstructuraux par microscopie électronique à balayage,
- étudier le comportement des bétons à base de filler calcaire et du laitier granulé de hauts fourneaux à long terme et vis-à-vis de la durabilité.
- une analyse de l'effet des superplastifiants de diverses natures sur la plasticité des mélanges cimentaires frais avec additions (Rhéomètres).

D'autre part, et à la suite des résultats obtenus, une attention particulière sera donnée à:

- la valorisation de la poudre de verre et surtout de la poussière de four de ciment pour l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons à moyens et longs termes.
- l'application des additions calcaires issues de concassage des granulats pour béton combinées au superplastifiant pour l'amélioration des résistances à jeunes âges et leur utilisation dans les bétons préfabriqués

Références bibliographiques

&

Normatives

Références bibliographiques

- [1] Bastier, R., Bastier, R., Bocan, A., & Gilbert, B. (2004). *Fours de cimenterie*. Ed. Techniques Ingénieur.
- [2] Ballim, Y., & Graham, P. C. (2004). *Early-age heat evolution of clinker cements in relation to microstructure and composition: implications for temperature development in large concrete elements*. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), 417-426.
- [3] Mehta, P. K. (1986). *Concrete. Structure, properties and materials*.
- [4] Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A., Nonat, A., Scherer, G. W., Schweitzer, J. S., ... & Thomas, J. J. (2011). *Mechanisms of cement hydration*. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1208-1223.
- [5] Regourd, M., & Hornain, H. (1975). *Applications de la microscopie électronique à balayage*. *Revue des matériaux de construction*, (693).
- [6] Taylor, H. F. (1986). *Proposed structure for calcium silicate hydrate gel*. *Journal of the American Ceramic Society*, 69(6), 464-467.
- [7] Taylor, H. F. (1997). *Cement chemistry*. Thomas Telford.
- [8] Cyr, M., Lawrence, P., & Ringot, E. (2006). *Efficiency of mineral admixtures in mortars: quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength*. *Cement and concrete research*, 36(2), 264-277.
- [9] Achour, T., Lecomte, A., Ouezdou, M. B., Mensi, R., & Joudi, I. (2008). *Contribution des fillers calcaires à l'adhérence pâte-granulat, Exemples tunisiens*. *Materials and Structures*, 41(5), 815-830.
- [10] Michel, F., Piérard, J., Courard, L., & Pollet, V. (2007). *Influence of physico-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances*. *Self-Compacting Concrete SCC 2007*, 205-210.
- [11] Divet, L., Le Roy, R., & Van Rompaey, G. (2006). *L'hydratation des laitiers de haut fourneau*. LCPC, ENPC, HOLCIM Paris, Marne la Vallée, Belgique.
- [12] Bellmann, F., & Stark, J. (2009). *Activation of blast furnace slag by a new method*. *Cement and Concrete Research*, 39(8), 644-650.
- [13] Ollivier, J. P., & Baron, J. (1997). *Les bétons: Bases et données pour leur formulation*. Paris: Eyrolles.
- [14] Rahhal, V., & Talero, R. (2005). *Early hydration of Portland cement with crystalline mineral additions*. *Cement and Concrete Research*, 35(7), 1285-1291.
- [15] Khokhar, M. I. A. (2010). *Optimisation of concrete mix design with high content of*

- mineral additions: effect on microstructure, hydration and shrinkage* (these de doctorat, Ecole centrale de Nantes), 229 p.
- [16] Shi, C., & Zheng, K. (2007). *A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete*. Resources, Conservation and Recycling, 52(2), 234-247.
- [17] Idir, R., Cyra, M., & Tagnit-hamou, A. (2010). *Peut-on valoriser massivement le verre dans les bétons*. Technol valoris, 16(5/6), 70-77.
- [18] Zeroub, H. (2012). *Valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable (Approche expérimentale)*. Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara, Boumerdès, 88 p.
- [19] Amadi, A. A., & Osu, A. S. (2016). *Effect of curing time on strength development in black cotton soil–Quarry fines composite stabilized with cement kiln dust (CKD)*. Journal of King Saud University-Engineering Sciences.
- [20] Adaska, W. S., & Taubert, D. H. (2008). *Beneficial uses of cement kiln dust*. In Cement Industry Technical Conference Record, 2008 IEEE (pp. 210-228).
- [21] Dupain, R., Lanchon, R., & Saint-Arroman, J. C. (2000). *Granulats, sols, ciments et bétons*. Paris: Casteilla.
- [22] Cestari, A. R., Vieira, E. F., Silva, E. C., Alves, F. J., & Andrade, M. A. (2013). *Synthesis, characterization and hydration analysis of a novel epoxy/superplasticizer oil well cement slurry–Some mechanistic features by solution microcalorimetry*. Journal of colloid and interface science, 392, 359-368.
- [23] Baron J. (1982) : *Le béton hydraulique*. Edité par Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Chapitre 6 « la structure des suspensions de ciment », p99-113.
- [24] Phan, T. H. (2007). *Rhéologie et stabilité des pâtes de ciment utilisées dans la formulation des bétons fluide*. Thèse de doctorat, Cachan, Ecole normale supérieure, 186 p.
- [25] Uchikawa, H., Hanehara, S., & Sawaki, D. (1997). *The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture*. Cement and Concrete Research, 27(1), 37-50.
- [26] Ramachandran, V. S., Malhotra, V. M., Jolicoeur, C., & Spiratos, N. (1998). *Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete*, Canmet Publication Mtl, Ottawa. TR) 97–14, ACI International.
- [27] Uchikawa, H., Uchida, S., Ogawa, K., & Hanehara, S. (1984). *Influence of CaSO₄·2H₂O, CaSO₄·12H₂O and CaSO₄ on the initial hydration of clinker having different burning degree*. Cement and Concrete Research, 14(5), 645-656.
- [28] Puertas, F., Santos, H., Palacios, M., & Martínez-Ramírez, S. (2005). *Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes*. Advances in Cement Research, 17(2), 77-89.

- [29] Knapen, E., & Van Gemert, D. (2009). *Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers*. Cement and concrete Research, 39(1), 6-13.
- [30] Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., & Matsuhisa, M. (2000). *Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer*. Cement and concrete research, 30(2), 197-207.
- [31] Perche, F. (2004). *Adsorption de polycarboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciments*. thèse de doctorat, Lausanne, école polytechnique fédérale de Lausanne, 320 p.
- [32] Aïtcin, P. C., Jiang, S. H. I. P. P. I. N. G., Kim, B. G., Nkinamubanzi, P. C., & Petrov, N. (2001). *L'interaction ciment/superplastifiant. Cas des polysulfonates*. Bulletin-laboratoires des ponts et chaussées, 87-98.
- [33] Aïtcin, P. C. (2001). *Bétons Haute Performance*, éditions Eyrolles.
- [34] Boukli H., (2009). *Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen*. These de doctorat. Université abou bekr belkaid , Tlemcen. Algérie. 193 p.
- [35] Dreux, G., & Festa, J. (1995). *Nouveau guide du béton: composants et propriétés, composition et dosage, fabrication, transport et mise en oeuvre, contrôle et normalisation*. Eyrolles.
- [36] Hacene, S. B., Ghomari, F., Schoefs, F., & Khelidj, A. (2009). *Etude expérimentale et statistique de l'influence de l'affaissement et de l'air occlus sur la résistance à la compression des bétons*. Journal Scientifique Libanais, 10(2), 81-100.
- [37] Chaid, R., Jauberthie R., Boukhaled A., Talah, A., 2009. *Endommagement, déformations et microstructure des BHP de pouzzolane*. 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria).
- [38] Glanville, W. H. (1947). *The grading of aggregates and workability of concrete*. Road Research Technical Paper, 5.
- [39] König, G., Holschemacher, K., Dehn, F., & Weiße, D. (2001). *Self-compacting concrete-time development of material properties and bond behaviour*. In Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Tokio, Japan (pp. 507-516).
- [40] Turcry, P. (2003). *Retrait et fissuration des bétons autoplaçants: Influence de la formulation*. These de Doctoral . Ecole centrale de Nantes. 223 p.
- [41] Miura, N., Takeda, N., Chikamatsu, R., & Sogo, S. (1993). *Application of super workable concrete to reinforced concrete structures with difficult construction conditions*. Special Publication, 140, 163-186.
- [42] Khayat, K. H., & Manai, K. (1996). *Les bétons autonivlants: propriétés, caractérisation et applications*, colloque sur les bétons autonivlants. Université de

Sherbroke, Canada, 8.

- [43] Jacobs, F., &Hunkeler, F. (1999). *Design of self-compacting concrete for durable concrete structures*. In Proceedings of the First International RILEM Symposium, Stockholm, Sweden, Eds. (pp. 397-407).
- [44] AFGC (Association Française de Génie Civil) (2000). *Bétons autoplaçants*. Recommandations provisoires.
- [45] Guellil, M. K., Ghomari, F., Hacene, S. M. E. A. B., & Taleb, O. (2014). *Etude et analyse de la formulation des bétons auto-plaçants par la méthode de la pâte en excès*. Nature &Technology, (10), 10.
- [46] De larrard, F. et Sedran, T. (2008). *BétonLabPro 3, Logiciel de formulation des bétons*, Laboratoire central des ponts et chaussées, Centre de Paris, France.
- [47] Adjoudj, M. (2015). *Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton* .Thèse de doctorat. Université de Cergy Pontoise.161 p.
- [48] Lapointe R. (1997), *Contribution à l'étude des méthodes d'injections des fissures dans le béton*, Mémoire des études graduées, Université McGill, Montréal, Canada.
- [49] Felekoğlu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A., &Uyulgan, B. (2006). *The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars*. Cement and concreteresearch, 36(9), 1719-1726.
- [50] Diederich, P. (2010). *Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.253 p.
- [51] Guettala, S., &Mezghiche, B. (2011). *Influence de l'addition du sable de dune en poudre au ciment sur les propriétés des bétons*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 15(10), 1483-1507.
- [52] Kara-Ali, R. (2002). *Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires* .Thèse de doctoral, Université de Cergy-Pontoise).202 p.
- [53] Kobayashi, K., & Uno, Y. (1990). *Influence of alkali on carbonation of concrete, part 2-influence of alkali in cement on rate of carbonation of concrete*. Cement and Concrete Research, 20(4), 619-622.
- [54] Menéndez, G. V. B. B., Bonavetti, V., & Irassar, E. F. (2003). *Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag*. Cement and Concrete Composites, 25(1), 61-67.
- [55] Shin, J. Y., Hong, J. S., Suh, J. K., & Lee, Y. S. (2008). *Effects of polycarboxylate-type superplasticizer on fluidity and hydration behavior of cement paste*. Korean Journal of Chemical Engineering, 25(6), 1553-1561.
- [56] Phung, Q. T., Maes, N., Jacques, D., De Schutter, G., & Ye, G. (2016). *Investigation of the changes in microstructure and transport properties of leached*

cement pastes accounting for mix composition. Cement and Concrete Research, 79, 217-234.

- [57] Arora, A., Sant, G., & Neithalath, N. (2016). *Ternary blends containing slag and interground/blended limestone: Hydration, strength, and pore structure*. Construction and Building Materials, 102, 113-124.
- [58] Irassar, E. F., Violini, D., Rahhal, V. F., Milanese, C., Trezza, M. A., & Bonavetti, V. L. (2011). *Influence of limestone content, gypsum content and fineness on early age properties of Portland limestone cement produced by inter-grinding*. Cement and Concrete Composites, 33(2), 192-200.
- [59] Hallal, A., Kadri, E. H., Ezziane, K., Kadri, A., & Khelafi, H. (2010). *Combined effect of mineral admixtures with superplasticizers on the fluidity of the blended cement paste*. Construction and Building Materials, 24(8), 1418-1423.
- [60] De Larrard, F., & Tondat, P. (1993). *Sur la contribution de la topologie du squelette granulaire à la résistance en compression du béton*. Materials and structures, 26(9), 505-516.
- [61] Ramezani-pour, A. M., & Hooton, R. D. (2014). *A study on hydration, compressive strength, and porosity of Portland-limestone cement mixes containing SCMs*. Cement and Concrete Composites, 51, 1-13.
- [62] Bessa A., *Evaluation de la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment dans les mortiers*. (2003)." XXI èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil - Prix "René Houpert", pp. 39-48.
- [63] Boudchicha, A. (2007). *Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons*. These de doctorat. Université Mentouri Constantine. Algérie. 294 p.
- [64] Yahia, A., Tanimura, M., & Shimoyama, Y. (2005). *Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio*. Cement and concrete Research, 35(3), 532-539.
- [65] Gallias, J. L., Kara-Ali, R., & Bigas, J. P. (2000). *The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes*. Cement and concrete research, 30(10), 1543-1549.
- [66] Zaitri, R., Bederina, M., Dif, F., & Guetaf, Y. (2015). *Etude de l'influence des fines calcaires sur le comportement du béton formulé à base des granulats recyclés*. In Rencontres Universitaires de Génie Civil.
- [67] De Larrard, F. (2000). *Structures granulaires et formulation des bétons*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- [68] Tsivilis, S., Chaniotakis, E., Badogiannis, E., Pahoulas, G., & Ilias, A. (1999). *A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements*. Cement and concrete composites, 21(2), 107-116.
- [69] Dhir, R. K., Limbachiya, M. C., McCarthy, M. J., & Chaipanich, A. (2007).

Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction. Materials and Structures, 40(5), 459-473.

- [70] Nehdi, M., Mindess, S., & Aïtcin, P. C. (1996). *Optimization of high strength limestone filler cement mortars.* Cement and Concrete Research, 26(6), 883-893.
- [71] Didouche, Z., & Ezziane, K., (2012). *Effet de l'addition d'un polycarboxylate sur les propriétés d'un ciment.* Colloque international « reduction du risque sismique chelef » les 10 et 11 octobre 2012.
- [72] Deboucha, W., Oudjit, M. N., Bouzid, A., & Belagraa, L. (2015). *Effect of incorporating blast furnace slag and natural pozzolana on compressive strength and capillary water absorption of concrete.* Procedia Engineering, 108, 254-261.
- [73] Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. İ. (2016). *Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties—a review.* Construction and Building Materials, 105, 423-434.
- [74] Babu, K. G., & Kumar, V. S. R. (2000). *Efficiency of GGBS in concrete.* Cement and Concrete Research, 30(7), 1031-1036.
- [75] Zeghichi, L. (2006). *Etude des bétons basiques a base des différents granulats.* These de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra. 162 p.
- [76] Bougara, A., Lynsdale, C., & Milestone, N. B. (2010). *Reactivity and performance of blast furnace slags of differing origin.* Cement and Concrete Composites, 32(4), 319-324.
- [77] Sarkar, S. L., & Xu, A. (1996). *Why Use Mineral Admixtures In High-performance Concrete.* Industria italiana del cemento, 714-726.
- [78] Pera J. Rols S., Chabannet and Ambroise J., 1998. *Influence of cement the type on the resistance on concrete to an agricultural environment.* In: Sidney Diamond Symposium on Materials science concrete, Edited by Menashi Cohen, Sidney Mindess and Jan Skalny, 419-431.
- [79] Wan H., Shui Z., Lin Z., 2004. *Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties,* Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 133–137.
- [80] Nacéri, A., & Messaoudene, I. (2006). *Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier.* Lebanese Science Journal, 7(2), 85.
- [81] Basheer PAM, Gilleece PRV, Long AE, McCarter WJ (2002). *Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration.* Cement and Concrete Composites 24: 437–449.
- [82] Luo R, Cai Y, Wang C, Huang X (2003). *Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete.* Cement and Concrete Research 33: 1–7

- [83] Boubekeur, T. (2009). *Evaluation des performances des ciments portland au calcaire: Exemple de la cimenterie de chlef*, mémoire de magister, université de Chlef. Algérie. 98 p.
- [84] Kumar, S., Bandopadhyay, A., Rajinikanth, V., Alex, T. C., & Kumar, R. (2004). *Improved processing of blended slag cement through mechanical activation*. Journal of materials science, 39(10), 3449-3452.
- [85] Mounanga, P., Khelidj, A., Loukili, A., & Baroghel-Bouny, V. (2004). *Predicting Ca (OH) 2 content and chemical shrinkage of hydrating cement pastes using analytical approach*. Cement and Concrete Research, 34(2), 255-265.
- [86] Wainwright, P. J., & Ait-Aider, H. (1995). *The influence of cement source and slag additions on the bleeding of concrete*. Cement and Concrete research, 25(7), 1445-1456.
- [87] Wainwright, P. J., & Rey, N. (2000). *The influence of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) additions and time delay on the bleeding of concrete*. Cement and Concrete Composites, 22(4), 253-257.
- [88] Ezziane K., Bougara A., Kassoul A., (2002). *Efficacité du laitier d'El Hadjar par le concept du liant équivalent*, 2ème colloque Maghrébin en Génie Civil, p. 87-96, Biskra, Algérie, 10- 11 décembre 2002.
- [89] Ma, W., Sample, D., Martin, R., & Brown, P. W. (1994). *Calorimetric study of cement blends containing fly ash, silica fume, and slag at elevated temperatures*. Cement, Concrete and Aggregates, 16(2), 93-99.
- [90] Khalifa, N. E. H., Bouasker, M., Mounanga, P., & Kahla, N. B. (2012). *Etude du comportement mécanique de liants binaires et ternaires à base de ciment Portland, de laitier de haut fourneau et de filler calcaire*. In MATEC Web of Conferences (Vol. 2, p. 01009). EDP Sciences.
- [91] Vafaei, M., & Allahverdi, A. (2016). *Influence of calcium aluminate cement on geopolymerization of natural pozzolan*. Construction and Building Materials, 114, 290-296.
- [92] Lemonis, N., Tsakiridis, P. E., Katsiotis, N. S., Antiohos, S., Papageorgiou, D., Katsiotis, M. S., & Beazi-Katsioti, M. (2015). *Hydration study of ternary blended cements containing ferronickel slag and natural pozzolan*. Construction and Building Materials, 81, 130-139.
- [93] Lemonis, N., Tsakiridis, P. E., Katsiotis, N. S., Antiohos, S., Papageorgiou, D., Katsiotis, M. S., & Beazi-Katsioti, M. (2015). *Hydration study of ternary blended cements containing ferronickel slag and natural pozzolan*. Construction and Building Materials, 81, 130-139.
- [94] Uzal, B. (2014). *7-Properties of concrete with high-volume pozzolans*. Eco-Efficient Concrete, 138-152.
- [95] Arya, C., Buenfeld, N. R., & Newman, J. B. (1990). *Factors influencing chloride-binding in concrete*. Cement and Concrete research, 20(2), 291-300.

- [96] Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., & Fairbairn, E. M. R. (2008). *Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars*. *Cement and Concrete composites*, 30(5), 410-418.
- [97] Roy, D. M., Arjunan, P., & Silsbee, M. R. (2001). *Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete*. *Cement and Concrete Research*, 31(12), 1809-1813.
- [98] Benaddi, E. (2008). *Formulation et Caractérisation des Bétons Autonivelants pour les Travaux de Réparation*. These de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra. 131 p.
- [99] Mansour, M. S., Abadlia, M. T., Jauberthie, R., Molez, L., Messaoudene, I., & Rangeard, D. (2010). *Pouzzolanité de la cendre volcanique de Béni Saf*. In Congrès International sur les Matériaux de l'Environnement.
- [100] Chaib, O., Mouli, M., Hanifi, M., Hamadache, M., Benosmane, S., & Dif, F. (2015). *Étude de l'influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance mécanique des mortiers à base ciments composés*. Communication dans un congrès. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France.
- [101] Benkaddour, M., Aoual, F. K., & Semcha, A. (2009). *Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle*. *Revue Nature et Technologie*, 1 (1).
- [102] Belaribi, N. B., Semcha, M., & Laoufi, L. (2003). *Influence de la pouzzolane de Beni-saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons*. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(3), 580-584.
- [103] Belhadj, A. M., Mahi, A., Aouel, M. K., Derbal, R., & Abdelhadi, H. (2016) *Valorization of wastemarble and naturalpozzolan in mortars*. *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (2) 429-437
- [104] Shi, C., & Day, R. L. (1995). *A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements*. *Cement and Concrete Research*, 25(6), 1333-1346.
- [105] Aichouba A., Ghrici M. et Benaissa A., (2005). *Effet de la pouzzolane naturelle de Béni-saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire*, Colloque Méditerranéen sur les Matériaux CMEDIMAT, Oran, Algérie, 6-7 décembre 2005.
- [106] Chabi, S., Mezghiche, B., & Guettala, H. (2004). *Etude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers*. *Courrier du Savoir*, 5, 03-08.
- [107] Kerbouche. A, Mouli .M, Laoufi .L, Senhadji .Y, Benosmane .S, (2009) . *Influence des ajouts minéraux sur les resistancesmecaniques des mortiers*. 1st International Conference on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) – October 12-14, 2009.
- [108] Idir, R. (2009). *Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique*. These de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse). 258 p.

- [109] Schwarz, N., & Neithalath, N. (2008). *Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration*. Cement and Concrete Research, 38(4), 429-436.
- [110] Zeghichi, L., Mezghiche, B., & Benghazi, Z. (2012). *Contribution à l'étude des propriétés du ciment blanc et composé*. Communication Science & Technologie, 10, 27-35.
- [111] Behim, M., & Ali Boucetta, T. (2013). *Valorisation du verre à bouteille comme addition fine dans les bétons autoplaçants*. Revue francophone d'écologie urbaine et industrielle, Déchets Science et Technique, 65, 20-28.
- [112] Chekireb, S. (2015). *Valorisation de la poudre de verre dans le béton autoplaçant*. These de doctorat, Université de Sherbrooke. 123 p.
- [113] Bensalem, S., Amouri, C., Houari, H., & Belachia, M. (2017). *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), 1515-1523.
- [114] Hussein, K. M., & Ahmed, E. (2016). *Formulation of the cement kiln dust (CKD) in concrete: Studies of the physical-chemical and mechanical properties*. International Journal of ChemTech Research. Vol.9, No.12, pp 695-704.
- [115] Elaleem, S. A., Aziz, M. A. A. E., & Didamony, H. E. (2003). *Effect of by-Pass Cement Dust Substitution on the Properties of Ordinary Portland and Slag Cements*. Journal of engineering and applied science-Cairo, 50(6), 1037-1054.
- [116] Benn, B. T., Baweja, D., & Mills, J. E. (2014). *The compressive strength of mortar made with cement containing limestone mineral addition, cement kiln dust and fly ash*. 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23) Byron Bay, Australia, 9-12 December 2014.
- [117] Al-Harthy, A. S., Taha, R., & Al-Maamary, F. (2003). *Effect of cement kiln dust (CKD) on mortar and concrete mixtures*. Construction and Building Materials, 17(5), 353-360.
- [118] Marku, J., Dumi, I., Lico, E., Dilo, T., & Cakaj, O. (2012). *The characterization and the utilization of cement kiln dust (CKD) as partial replacement of Portland cement in mortar and concrete production*. Zastita Mater, 53, broj-4.
- [119] Shah, S. P., & Wang, K. (2004). *Development of green cement for sustainable concrete using cement kiln dust and fly ash*. In Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology (pp. 15-23).
- [120] Siddique, R., & Rajor, A. (2012). *Use of cement kiln dust in cement concrete and its leachate characteristics*. Resources, Conservation and Recycling, 61, 59-68.
- [121] Najim, K. B., Al-Jumaily, I., & Atea, A. M. (2016). *Characterization of sustainable high performance/self-compacting concrete produced using CKD as a cement replacement material*. Construction and Building Materials, 103, 123-129.
- [122] Mehetre, C. U., Urade, P. P., Mahure, S. H., & Ravi, K. (2014). *Comparative study*

of properties of self compacting concrete with metakaolin and cement kiln dust as mineral admixtures. International Journal of Research in Engineering & Technology, 2(4), 37-52.

- [123] Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Poppe, A. M., & Taerwe, L. (2007). *Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes.* Cement and Concrete Composites, 29(2), 94-102.
- [124] El Hilali, A. (2009). *Experimental study of the rheological behavior and self-compacting concrete (SCC): influence of limestone and fine plant fibers* These de doctorat, University of Cergy-Pontoise, France . 183 p.
- [125] Zhu, W., & Gibbs, J. C. (2005). *Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete.* Cement and Concrete Research, 35(8), 1457-1462.
- [126] Gibbs, J. C., & Zhu, W. (1999) . *Strength of hardened self-compacting concrete.* In Proceedings of First international RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suede (pp. 199-209).
- [127] Petersson, O. (2001). *Limestone powder as filler in self-compacting concrete-frost resistance and compressive strength.* In Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan (pp. 277-284).
- [128] Celik, T., & Marar, K. (1996). *Effects of crushed stone dust on some properties of concrete.* Cement and Concrete research, 26(7), 1121-1130.
- [129] Voglis, N., Kakali, G., Chaniotakis, E., & Tsivilis, S. (2005). *Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements.* Cement and Concrete Composites, 27(2), 191-196.
- [130] Heikal, M., El-Didamony, H., & Morsy, M. S. (2000). *Limestone-filled pozzolanic cement.* Cement and Concrete Research, 30(11), 1827-1834.
- [131] Zajac, M., Rossberg, A., Le Saout, G., & Lothenbach, B. (2014). *Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements.* Cement and Concrete Composites, 46, 99-108.
- [132] Lee, S. T., Hooton, R. D., Jung, H. S., Park, D. H., & Choi, C. S. (2008). *Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulfate solutions at ambient temperature.* Cement and concrete research, 38(1), 68-76.
- [133] Behim, M., Cyr, M., & Clastres, P. (2011). *Physical and chemical effects of El Hadjar slag used as an additive in cement-based materials.* European Journal of Environmental and Civil Engineering, 15(10), 1413-1432.
- [134] Hadj-Sadok, A., Kenai, S., Courard, L., & Darimont, A. (2011). *Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag.* Construction and Building Materials, 25(2), 1018-1025.
- [135] Chaid, R. Jauberthie and A. Boukhaled, (2010). *Effect of limestone addition on concrete durability,* Lebanese Science Journal, 91-103.

- [136] Chen, J. J., Kwan, A. K. H., & Jiang, Y. (2014). *Adding limestone fines as cement paste replacement to reduce water permeability and sorptivity of concrete*. *Construction and Building Materials*, 56, 87-93.
- [137] Li, W., Huang, Z., Cao, F., Sun, Z., & Shah, S. P. (2015). *Effects of nano-silica and nano-limestone on flowability and mechanical properties of ultra-high-performance concrete matrix*. *Construction and Building Materials*, 95, 366-374.
- [138] Liao, T. S., Hwang, C. L., Ye, Y. S., & Hsu, K. C. (2006). *Effects of a carboxylic acid/sulfonic acid copolymer on the material properties of cementitious materials*. *Cement and Concrete Research*, 36(4), 650-655.
- [139] Valcuende, M., Parra, C., Marco, E., Garrido, A., Martínez, E., & Cánoves, J. (2012). *Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the porous structure of self-compacting concrete*. *Construction and Building Materials*, 28(1), 122-128.
- [140] Kourounis, S., Tsivilis, S., Tsakiridis, P. E., Papadimitriou, G. D., & Tsibouki, Z. (2007). *Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag*. *Cement and Concrete Research*, 37(6), 815-822.
- [141] Siad, H., Lachemi, M., Bernard, S. K., Sahmaran, M., & Hossain, A. (2015). *Assessment of the long-term performance of SCC incorporating different mineral admixtures in a magnesium sulphate environment*. *Construction and Building Materials*, 80, 141-154.
- [142] J. Barron, J. P. Olivier, *Concretes: Bases et données pour leur formulation*. (Eyrolles, 1996).
- [143] Behim, M. (2005). *Sous-produits industriels et développement durable: Réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'El-Hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire*. Thèse de doctorat, Université de Badji Mokhtar. Annaba. Algérie.
- [144] B. T. Ali, M. Behim, & W. Laifa. (2015). *Valorisation du laitier granulé et de la poudre de verre dans les bétons autoplaçants (BAP)*. *Revue des sciences et de la technologie*. 27, 30-39.
- [145] T. Bezzi. (2011). *Etude et caractérisation d'un béton autoplaçant fait à base d'un ciment avec ajout d'argile cuite et broyée*. Mémoire de magister, Université Abderrahmane Mira de Béjaia).
- [146] Soroushian, P. (2012). *Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement*. *Construction and Building Materials*, 29, 368-377.
- [147] Liu, M. (2011). *Incorporating ground glass in self-compacting concrete*. *Construction and Building Materials*, 25(2), 919-925.

Références Normatives

AFGC, 08 : Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants, 2008.

ASTM C 618-94: coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete, ASTM Standards, 1994.

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.

EN 12350 – 8 : Essai pour béton frais - Partie 8 : béton autoplaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams, novembre 2010.

EN 206-1 : Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité. Norme européenne, 2002.

NF EN 12350-10 : Essai pour béton frais - Partie 10 : béton autoplaçant - Essai à la boîte en L, novembre 2010.

NF EN 12350-11 : Essai pour béton frais - Partie 11 : béton autoplaçant - Essai de stabilité au tamis, novembre 2010.

NF EN 12350-2 : Essai pour béton frais – Partie 2 : essai d'affaissement, décembre 1999.

NF EN 12350-6 : Essai pour béton frais - Partie 6 : masse volumique, décembre 1999.

NF EN 12390-3 : Essai pour béton durci – Résistance à la compression des éprouvettes, février 2003.

NF EN 12390-6 : Essai sur béton durci - Partie 6 : résistance en traction par fendage des éprouvettes, octobre 2001.

NF EN 196-1 : Méthodes d'essais des ciments – partie 1 : Détermination de la résistance, 1996.

NF EN 196-3 : Méthodes d'essais des ciments – partie 3 : Détermination du temps de prise et de stabilité, aout 1995.

NF EN 196-6 : Méthodes d'essais des ciments – partie 6: Détermination de la finesse, aout 1990.

NF EN 206-9 Béton, Partie 9: Règles complémentaires pour le béton autoplaçant, juin 2010.

NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, 2012.

NF ENV 197-1 : Ciment- composition spécifications et critère de conformité des ciments courants, février 2001.

NF P 18 - 573 : Granulats- Essai de Los-Angeles, décembre 1990.

NF P 18- 407 : Bétons- Essai de flexion, décembre 1981.

NF P 18 509 : Additions pour béton hydraulique - Additions siliceuses. Spécifications et critères de conformité, décembre 1998.

NF P 18- 555 : Granulats-mesures des masses volumiques, du coefficient d'absorption et de teneur en eau des sables, octobre 1990.

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, juin 1985.

NF P 18-411: Bétons - Caractéristiques communes des machines hydrauliques pour essais de compression, flexion et traction des matériaux durs, décembre 1981.

NF P 18-412: Bétons - Caractéristiques particulières des machines hydrauliques pour essais de compression (presses pour matériaux durs), décembre 1981.

NF P 18-451 : Essai d'affaissement, décembre 1981.

NF P 18-506 : Additions pour béton hydraulique - Laitier vitrifié moulu de haut-fourneau, mars 1992.

NF P 18-508 : Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité, 2012.

NF P 18-545 : Granulats - Éléments de définition, conformité et codification, 2011. Norme française, 1990.

NF P 18-554 : Granulats-mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de teneur en eau des gravillons et cailloux, octobre 1990.

NF P 18-592 : Granulats - Essai au bleu de méthylène - Méthode à la tâche. Norme française, 1990.

NF P15-301 : Liant hydrauliques-vérification de la qualité des livraisons emballage, décembre 1981.

NF P18 - 598 : Granulats- Equivalent de sable, octobre 1991.

NF P18-934-2 : Adjuvant pour béton, mortier et coulis – adjuvant pour béton définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, septembre 2002.

NFP 18-406 : Bétons- Essai de compression, décembre 1981.

NF P18-404 : Bétons - Essais d'étude, de convenance et de contrôle - Confection et conservation des éprouvettes. Norme française, 1981.

XP P 18-305 : Bétons prêt à l'emploi, 1996.

Annexes

ANNEXE A: ABAQUES ET TABLEUX METHODE C.E.S DREUX-GORISSE

I- DOSAGE EN CIMENT ET EAU

$$f_c' = f_{c28} + 8 \text{ (Mpa)}$$

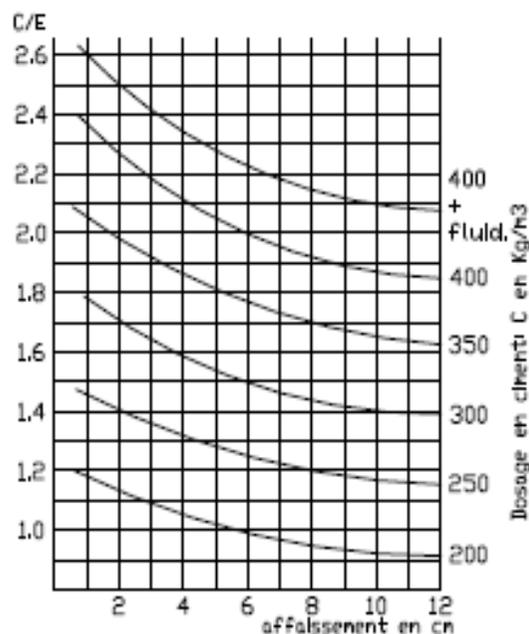
$$f_c' = \sigma_c \cdot G \cdot (C/E - 0,5)$$

Avec :

f_c' : résistance visée à 28 jours
C : dosage du ciment en kg/m^3 de béton
E : dosage de l'eau en kg/m^3 de béton
 σ_c : Classe vrale du ciment en MPa
G : coefficient granulaire

Valeurs approximatives du coefficient Granulaire G

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins $D \leq 12,5$	Moyens $20 \leq D \leq 31,5$	Gros
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45



Graphique indiquant
Approximativement
le dosage en ciment
en fonction de C/E
et de l'ouvrabilité désirée

Correction sur le dosage en eau

Diamètre en mm	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50
Correction en %	+9	+6	+4	+2	0	-2	-4	-6

II- DOSAGE EN POURCENTAGE DES GRANULATS

A- COURBE GRANULAIRE DE REFERENCE

Origine O (tamis 0,063 ; 0%)

Point de brisum A (tamis X_A ; Y_A %)

Avec :

$$X_A = D/2 \text{ si } D \leq 20$$

$$X_A = \text{milieu de l'intervalle } [5 ; D] \text{ si } D > 20$$

$$Y_A = 50 - \sqrt{1,25D} + K + K_s + K_p$$

K , optimisation de la compacité en fonction du type de vibration, de la forme des granulats, et du dosage en ciment.
Voir tableau ci-contre

Format des granulats	Vibration	Faible		Normale		Puissante	
		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage ciment	400+f	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6	

K_s , ajustement pour les sables de granularité un peu grossière: $FM > 2,8$
 $K_s = 5,4 \cdot FM - 15$ (FM : module de finesse du sable)

K_p , ajustement du dosage en sable pour faciliter le transfert par les pompes à béton.

$K_p = 0$ si béton non pompable
 $5 \leq K_p \leq 10$ si béton pompable.

Extrémité B (tamis D ; 100%)

B- LIGNE DE PARTAGE

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe granulaire du plus petit granulat au point d'ordonnée 5% de la courbe granulaire du plus gros granulat.

III- DOSAGE EN MASSE DES GRANULATS

Coefficient de compacité :

Consistance	Serrage	Coefficient γ en fonction du diamètre D des granulats						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
Ferme	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- sable roulé et gravier concassé : -0,01
- sable et gravier concassé : -0,03

$$\text{Si } C \geq 350 \text{ kg/m}^3, \gamma = \gamma + \frac{C-350}{5000}$$

Annexe B

Tableau B.1 : Résultats des résistances à la compression des mortiers à filler calcaire seul

Notation	2j	7j	28j
R	19,91	36,4	48,81
5%	17,28	34,25	45,62
10%	14,95	32,15	40,35
15%	12,6	29,97	36,67
20%	11,59	27,4	33,8
25%	10,71	25,8	31,81

Tableau B.2 : Résultats des résistances à la traction des mortiers à filler calcaire seul

Notation	2j	7j	28j
R	3,05	6,3	7,79
5%	2,9	6,19	7,52
10%	2,68	5,82	6,94
15%	2,29	5,45	6,6
20%	2,06	4,67	5,93
25%	1,9	4,3	5,67

Tableau B.3 : Résultats des résistances à la compression des mortiers à additions combinées

Notation	7j	28j
R	36,4	48,81
FC20	27,4	33,8
FC₁₅ LG₅	29,42	35,75
FC₁₀ LG₁₀	30,47	38,27
FC₁₅ PN₅	28,9	35,98
FC₁₀ PN₁₀	30,05	39,07
FC₁₀ LG₅ PN₅	25,8	34,58

Tableau B.4 : Résultats des résistances à la compression des bétons à additions combinées sans superplastifiant

Notation	7j	28j
BT	31,24	41,11
BFC₁₀	27,52	39,31
BFC₁₅	23,48	33,27
BFC₂₀	25,71	35,25
BFC₁₅PN₅	26,05	35,58
BFC₁₀PN₁₀	26,06	34,79
BFC₁₅ LG₅	27,61	40,42
BFC₁₀ LG₁₀	24,72	38,49
BFC₁₀ LG₅ PN₅	17,72	29,46

Tableau B.5 : Résultats des résistances à la compression des bétons à additions combinées avec superplastifiant

Notation	7j	28j
BST	40,62	45,7
BSFC₁₀	39,86	48,68
BSFC₁₅	34,57	45,35
BSFC₂₀	31,03	40,98
BSFC₁₅PN₅	29,98	38,42
BSFC₁₀PN₁₀	30,93	40,32
BSFC₁₅ LG₅	28,24	39,75
BSFC₁₀ LG₁₀	30,95	41,58
BSFC₁₀ LG₅ PN₅	31,3	38,24

Tableau B.6 : Propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP.

Notation	Etalement (cm)	Stabilité au tamis (%)	Boite en L	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la traction (MPa)		
				1j	14j	28j	1j	14j	28j
BAP1	73,00	9,60	0,96	5,4	27,1	32,5	0,68	2,93	3,53
BAP2	73,40	12,00	0,95	14,69	36,55	40,62	1,47	3,29	3,82
BAP3	73,80	12,40	0,96	15,01	36,98	41,11	1,57	3,63	4,06
BAP4	74,50	12,80	0,96	15,99	38,93	43,1	1,65	3,86	4,26
BAP5	73,30	10,80	0,94	7,6	29,2	35,15	0,79	3,01	3,62
BAP6	73,80	11,50	0,95	10,2	32,1	40,08	0,98	3,11	3,76
BAP7	73,90	13,40	0,95	12,6	34,3	43,5	1,28	3,46	4,01



POLYFLOW® LSR 7200

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934.2 tab. 1.3.1 3.2

Présentation

POLYFLOW® LSR 7200 est un superplastifiant/réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de polycarboxylate.

Domaines d'application

POLYFLOW® LSR 7200 permet la fabrication de bétons plastiques à auto plaçants transportés sur de longues distances et pompés.

Dans les bétons auto plaçants, POLYFLOW® LSR 7200 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

POLYFLOW® LSR 7200 permet de réduire significativement le rapport E/C ce qui améliore la durabilité du béton durci (diminution de la perméabilité, augmentation des résistances mécaniques, diminution du retrait).

Caractères généraux

POLYFLOW® LSR 7200 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Longue rhéologie (>3h),
- Robustesse à la ségrégation,
- Qualité de parement.

Caractéristiques Aspect

Liquide brun clair

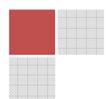
Condit

- Fûts de 220 kg
- Conteneur perdu de 1100 kg
- Vrac

Stockage

Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. POLYFLOW® LSR 7200 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine.

Construction





Construction

En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

Conservation

1 1/2 emballage intact

Données techniques

densité

1,06 ± 0,01

pH

4,5 à 6,5

Teneur en ions Cl-

≤ 0,1%

Teneur en Na₂O éq.

≤ 1%

Extrait sec

33% à 1%

Conditions d'application

Dosage

Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.

Mise en œuvre

POLYFLOW® LSR 7200 est ajouté, soit en même Temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

Mentions légales

les propriétés énumérées sont seulement à titre de conseils et ne constituent pas une garantie de performance .L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Toutes nos fiches techniques sont mises à jour régulièrement, il est de la responsabilité de l'utilisateur d'obtenir la version la plus récente.

SOLU EST ®

Zone Industrielle Sidi Salem
ANNABA 23000-ALGERIE
Tél/Fax : +213 38 53 94 68
Tél : 0560 91 53 30 /31 -32
E.mail : solu-est@hotmail.fr
www.soluest-DZ.com

