

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des sciences de l'ingénieur

département de Génie Civil

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT EN SCIENCES

UTILISATION DES ADDITIONS MINÉRALES POUR L'AMÉLIORATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET LE COMPORTEMENT VIS-A-VIS LA RÉACTION ALCALI SILICE DES MORTIERS ET DES BÉTONS

Option

Matériaux et durabilité

Présentée et soutenue par

DOUAISSIA Zineb

le 17 juillet 2021

DEVANT LE JURY

Président	Mr ACHOURA Djamel	Pr	Université d'Annaba
Rapporteur	Mr MERZOUZ Mouloud	Pr	Université d'Annaba
Examineur	Mr ARABI Nouredine	Pr	Université d'Annaba
Examineur	Mr BELACHIA Mouloud	Pr	Université de Guelma
Examineur	Mr BENOUIS Abdelhalim	Pr	Université de Guelma
Examinatrice	Mme HEBHOUB Houria	Pr	Université de Skikda
Membre invité	Mr BENZAOUK Amar	MC	Université Picardie Jules verne Amiens

A LA MEMOIRE DE MOSTEFA ARRAR

Mostefa ARAAR est décédé le 23 juin 2004 à l'âge de 43 ans, suite à un tragique accident de la route .

Il était Ingénieur d'état de l'Université d'Annaba , Docteur en génie civil de l'INSA de Lyon et Enseignant et Chercheur au département de Génie Civil de l'Université d'Annaba.

Il a occupé divers postes de responsabilités; Directeur de recherche, Président du conseil scientifique et du comité scientifique.

Ma pensée va à sa famille ,ses collègues et ses étudiants.

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été effectué au sein du laboratoire matériaux, géomatériaux et environnement (LMGE) du département de Génie Civil de l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, du laboratoire des travaux publics de l'est (LTP EST) et de la société des ciments de hadjar-soud (SCHS).

Je tiens tout d'abord à remercier profondément Pr. MERZOUZ Mouloud, pour avoir accepté de diriger ce travail et qui m'a soutenu, encouragé et pour la confiance qu'il m'a accordée pendant toute la durée de la thèse.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance au Pr. ACHOURA Djamel, directeur du LMGE, Mr. SAADOU Mohamed, directeur du LTP EST et Mme ZAABAT Hanane du laboratoire du SCHS.

Je voudrais également exprimer mes sincères remerciements aux Pr. ACHOURA Djamel pour avoir accepté de présider mon jury, Pr. ARABI Noureddine, Pr. BENOUIS Halim et Pr. BELACHIA Mouloud pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont particulièrement au Pr. HABITA Med Faouzi, pour avoir suivi l'évolution de mes travaux de recherche pendant les six premières années de la thèse.

Un grand merci aussi à le docteur Benazzouk. Amar, ainsi que Mme Derbal Hassina du laboratoire des techniques innovants (IUT d'Amiens, France) pour leur aide et leurs conseils.

Je tiens à remercier le Professeur Redjel. B et tous les enseignants de département de Génie civil qui ont contribué à notre formation, et leurs conseils fructueux durant toute la période de recherche, par le suivi régulier de l'avancement de nos travaux.

Je tiens aussi à remercier mes amies (Imen, F.Zohra, Houria, Yasmine, Amina, Nadia, Meriem, Amira, Fouzia et Ghania) et mes collègues (Berjam, Hadidane, Lekhel, et Djigader).

Je remercie tous les techniciens de laboratoire pour leur disponibilité, leurs compétences et leur sympathie.

je remercie tout particulièrement mes chers parents, Meftah Abdel Mouemen mon mari, mon frère et mes sœurs, mon fils et ma fille, qui étaient à mes côtés tout au long de ce travail. C'est grâce à leur amour, leur soutien et leur courage que j'en suis là aujourd'hui. Je leur dédie ce manuscrit en gage de ma reconnaissance.

Enfin, je tiens à remercier tous(se) qui ont contribué de près ou de loin à ma réussite.

RESUME

La construction est responsable de 5 % à 10 % des rejets mondiaux de dioxyde de carbone, ce rejet est imputé principalement à la production de ciment à hauteur de 95%, l'une des voies envisagées afin de réduire cette part de CO₂ est la substitution partielle du ciment par des additions minérales d'origine naturelle ou industrielle. Deuxièmement, ce rejet est également imputé à l'extraction et au transport des granulats utilisés pour formulé du béton. La méthode utilisée pour réduire ces rejets consiste à utiliser les sous-produits de consommation ou d'activités industrielles comme source alternative de granulats, c'est par exemple le cas des déchets de verre.

Nous proposons dans cette étude, de valoriser une catégorie de matériaux naturels ou sous-produits industriels disponibles en Algérie, afin de les utiliser dans la fabrication du béton, en substituant des taux volumiques de ciment allant de 10 % à 50 % par des additions minérales, telles que le laitier granulé, la pouzzolane naturelle, la fumée de silice, filler calcaire et poudre de verre. Et de vérifier l'effet de ces additions minérales sur les propriétés physico-mécaniques des pâtes de liant, des mortiers normalisés et des bétons.

Aussi, le verre a été incorporé dans les bétons sous forme de granulat, en fonction de sa granulométrie, le verre peut manifester une réaction de type alcali-silice (RAS) entraînant des effets néfastes. La réaction alcali-silice (RAS) est une réaction chimique délétère entre les alcalins du ciment et la silice réactive des granulats. Elle peut induire l'expansion, la fissuration et la perte des performances mécaniques du béton. L'efficacité des additions minérales à contrer les effets néfastes de la réaction alcali-silice (RAS) dans des mortiers et des bétons à base de verre recyclé, ont été vérifiées.

Les mortiers ont été testés par un essai accéléré par autoclave selon la norme NF P 18 590. Quant aux bétons ont été testés par l'essai de réacteur dont la norme NF P 18 454 et le fascicule d'application FD P 18-456 ont servi de cadre expérimental. Les résultats obtenus ont déterminé le rôle des additions minérales sur la structure et les propriétés des bétons, d'une part, et elles ont apporté des éléments scientifiques pour la proposition d'une méthodologie de formulation de béton avec des additions minérales afin de permettre une optimisation de leur utilisation pour l'amélioration des caractéristiques rhéologiques, mécaniques et la durabilité des bétons, d'autre part.

Mots clés : Verre recyclé, Laitier granulé, Pouzzolane naturelle, Fumée de silice, Filler calcaire, Poudre de verre, Réaction alcali silice (RAS), Performances mécaniques.

ABSTRACT

Construction is responsible for 5 % to 10 % of global emissions of carbon dioxide, this release is attributed to the production of cement up to 95 %, one of the ways envisaged to reduce this share of CO₂ is the partial substitution of cement by mineral admixtures of natural or industrial origin. After cement, the second constituents of concrete are aggregates, many by-products of consumption, or industrial activities, are today being studied with a view to their use as a source of aggregates, this is the case, for example, with waste glass.

We are proposing in this study, to enhance a category of natural materials or industrial by-products available in Algeria, , in order to use them in the manufacture of concrete, by substituting volume rates of cement ranging from 10 % to 50 % with mineral admixtures, such as granulated slag, natural pozzolan, silica fume, limestone filler and glass powder. And to verify the effect of these mineral admixtures on the physico-mechanical properties of binder pastes, standardized mortars and concrete.

Also, the glass has been incorporated into the concretes in the form of aggregate, depending on its grain size, the glass can manifest an alkali-silica reaction (ASR) leading to adverse effects. The alkali-silica reaction (ASR) is a deleterious chemical reaction between the cement alkalis and the aggregates reactive silica. It can induce the expansion, the cracking and the loss of the mechanical performances of the concrete. The effectiveness of mineral admixtures to counter the harmful effects of the alkali-silica reaction (ASR) in recycled glass mortars and concretes, has been verified.

The mortars have been tested by an accelerated autoclave test according to NF P 18 590 standard. As for the concretes were placed in a reactor, the NF P 18 454 standard and the FD P 18-456 application booklet serving as an experimental framework. The results obtained determined the role of mineral admixtures on the structure and properties of concrete , on the one hand, and they provided scientific elements for the proposal of a methodology for formulating concrete with mineral additions in order to allow a optimization of their use for improving the rheological, mechanical characteristics and durability of concrete, on the other hand.

Key words: Recycled glass, Granulated slag, Natural pozzolan, Silica fume, Limestone filler, Glass powder, Alkali silica reaction (ASR), Mechanical performance.

ملخص

إن عملية الإنشاء مسؤولة عن 5% إلى 10% من الانبعاث العالمي لثاني أكسيد الكربون ، ويعزى هذا الانبعاث أولاً إلى إنتاج الأسمنت بنسبة تصل إلى 95% ، وإحدى الطرق المنتهجة لتقليل هذه الحصة من ثاني أكسيد الكربون هي الإستبدال الجزئي للإسمنت بالإضافات المعدنية من أصل طبيعي أو صناعي. ثانياً يعزى هذا الانبعاث أيضاً إلى قلع و نقل الركام المستخدم في صناعة الخرسانة ، و الطريقة المنتهجة للتقليل من هذا الانبعاث هو استخدام نفايات الاستهلاك أو الأنشطة الصناعية كمصدر بديل للركام ، على سبيل المثال ، نفايات الزجاج.

تقترح من خلال هذه الدراسة ، تمييز فئة من المواد الطبيعية أو النفايات الصناعية المتوفرة في الجزائر ، و استخدامها في صناعة الخرسانة ، و ذلك باستبدال نسب حجمية من الإسمنت تتراوح من 10% إلى 50% بالإضافات المعدنية ، مثل الخبث حبيبي ، البوزولان الطبيعي ، دخان السيليكا ، حشو الجير ومسحوق الزجاج . و التحقق من تأثير هذه الإضافات المعدنية على الخواص الفيزيائية و الميكانيكية للخرسانة.

أيضاً ، تم دمج الزجاج في الخرسانة على شكل ركام ، حسب قياس حبيباتها يمكن للزجاج أن يسبب تفاعل من النوع السيليكا قلوي مما يسبب تأثيرات ضارة في الخرسانة. إن التفاعل السيليكا قلوي هو تفاعل كيميائي ضار يحدث بين عناصر الإسمنت القلوية وسيليكا الركام التفاعلية . يمكن أن يؤدي إلى التمدد والتشقق ونقص الخواص الميكانيكية للخرسانة . و تم التحقق من فعالية الإضافات المعدنية لمواجهة الآثار الضارة للتفاعل السيليكا قلوي في الملاط والخرسانة المصنوعة من الزجاج المعاد تدويره.

تم اختبار الملاط بواسطة تجربة الأوتوكلاف المعجل وفقاً للمعيار NF P 18 590 . و تم اختبار الخرسانة بواسطة تجربة المفاعل حيث إعتدنا على المعيار NF P 18 454 و المعيار FD P 18-456 كإطار للتجربة . حددت النتائج التي تم الحصول عليها دور الإضافات المعدنية على هيكل وخصائص الخرسانة ، من ناحية ، و عملت على توفير العناصر العلمية لاقتراح منهجية لصناعة خرسانة تحتوي على الإضافات المعدنية من أجل الإستخدام الأمثل لها الذي يحسن الخصائص الانسيابية والميكانيكية والديمومة للخرسانة ، من ناحية أخرى.

الكلمات المفتاحية: الزجاج المعاد تدويره ، الخبث المحبب ، البوزولان الطبيعي ، دخان السيليكا ، حشو الجير ، مسحوق الزجاج ، تفاعل السيليكا القلوي ، الخواص الميكانيكية

Table des matières

A la mémoire de	i
Remerciements	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
ملخص	v
Table des matières.....	vi
Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xiii
Glossaire.....	xiv

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE I

Revue Bibliographique

I.1 INTRODUCTION.....	8
I.2 LE CIMENT PORTLAND	8
I.2.1 Définition du ciment.....	8
I.2.2 Hydratation du ciment portland.....	8
I.2.3 Types de ciments.....	9
I.3 CIMENT PORTLAND AU LAITIER.....	10
I.3.1 Le laitier de haut fourneau.....	10
I.3.2 Hydratation des ciments Portland au laitier.....	10
I.3.3 Caractéristiques des ciments et des bétons à base de laitier.....	11
I.4 CIMENT PORTLAND AUX POUZZOLANES.....	12
I.4.1 Les pouzzolanes naturelles.....	12
I.4.2 Hydratation des ciments pouzzolaniques.....	12
I.4.3 Caractéristiques des ciments et des bétons à base de pouzzolane.....	12
I.5 CIMENT PORTLAND A LA FUMÉE DE SILICE.....	13
I.5.1 La fumée de silice.....	13
I.5.2 Hydratation des ciments aux fumées de silice.....	14
I.5.3 Caractéristiques des ciments et des bétons à base de la fumée de silice.....	14
I.6 CIMENT PORTLAND AUX CALCAIRES.....	15
I.6.1 Les fillers calcaires.....	15
I.6.2 L'hydratation des ciments aux fillers calcaires.....	15
I.6.3 Caractéristiques des ciments et des bétons aux fillers calcaires.....	16
I.7 CIMENT PORTLAND AUX POUDDRES DE VERRE.....	18
I.7.1 Le verre.....	18
I.7.2 Caractéristiques des ciments et des bétons avec de la poudre de verre.....	18
I.8 UTILISATION DU VERRE EN TANT QUE GRANULAT.....	19
I.8.1 Effet du granulats de verre sur les propriétés à l'état frais des bétons.....	19

1.8.2	Effet du granulats de verre sur les propriétés à l'état durci des bétons.....	19
1.9	LA REACTION ALCALI-SILICE.....	20
I.9.1	Définition de la réaction alcali- silice.....	20
I.9.2	Les granulats de verre et la réaction alcali- silice.....	21
I.9.3	Effet des additions minérales sur la réaction alcali-silice.....	22
I.9.4	Mécanismes d'action des additions minérales sur la RAS.....	29
I.10	CONCLUSION	31

CHAPITRE II

Matériaux et Méthodes Expérimentaux

II.1	INTRODUCTION	34
II.2	METHODOLOGIE EXPERIMENTALE	34
II.3	CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES	35
II.3.1	Ciment	35
II.3.2	Additions Minérales.....	36
II.3.3	Granulats	37
II.3.3.1	Sable normalisé (SN).....	37
II.3.3.2	Granulats concassés (GC).....	37
II.3.3.3	Granulats de verre recyclé (GVR)	38
II.3.4	Adjuvant	38
II.3.1	Eau de gâchage.....	38
II.4	METHODES EXPERIMENTALES	38
II.4.1	Caractéristiques des granulats	38
II.4.1.1	Masse volumique.....	38
II.4.1.2	Analyse granulométrique.....	38
II.4.1.3	Equivalent de sable	39
II.4.1.4	Absorption d'eau	39
II.4.1.5	Résistance à l'abrasion (Los – Angeles).....	40
II.4.2	Essais sur des pâtes de liant.....	40
II.4.2.1	Consistance normalisée	40
II.4.2.2	Temps de prise.....	40
II.4.3	Essais sur mortier.....	40
II.4.3.1	Compacité du mortier frais	40
II.4.3.2	Maniabilité du mortier frais	41
II.4.3.3	Essai accéléré par autoclave.....	42
II.4.3.4	Résistances mécaniques	43
II.4.4	Essais sur les bétons	43

II.4.4.1	Essais Ultrasoniques	43
II.4.4.2	Réactivité de béton vis-à-vis de l'alcali réaction.....	44
II.4.4.3	Mesure de la fissuration des éprouvettes.....	44
II.4.4.4	Résistances mécaniques des bétons.....	45
II.5	CONCLUSION.....	46

CHAPITRE III

Effet des Additions sur les Mortiers

III.1	INTRODUCTION.....	49
III.2	EFFET DES ADDITIONS SUR LES PATES DE LIANT.....	49
III.2.1	Effet des additions minérales sur la consistance normale	49
III.2.2	Effet des additions minérales sur la prise du ciment.....	50
III.3	FORMULATION DES MORTIERS SANS ADJUVANTS (SSP).....	52
III.4	EFFET DES ADDITIONS SUR LES MORTIERS SANS ADJUVANTS.....	53
III.4.1	Effet des additions sur les mortiers frais sans adjuvant (SSP)	53
III.4.1.1	La compacité des mortiers frais sans adjuvant (SSP).....	53
III.4.1.2	La maniabilité des mortiers frais sans adjuvant (SSP)	54
III.4.2	Les performances mécaniques des mortiers sans adjuvant (SSP)	56
III.4.2.1	Courbes (σ - ϵ) des mortiers sans adjuvant (SSP).....	56
III.4.2.2	Les performances mécaniques des mortiers sans adjuvant (SSP)	59
III.4.2.3	Corrélation entre les performances mécaniques des mortiers sans adjuvants.....	62
III.5	FORMULATION DES MORTIERS AVEC ADJUVANT (SP).....	62
III.6	EFFET DES ADDITIONS SUR MORTIERS AVEC ADJUVANTS (SP).....	63
III.6.1	Besoin en adjuvants des mortiers à même consistance	63
III.6.2	Performances mécaniques des mortiers avec adjuvants (SP).....	64
III.7	CORRÉLATION ENTRE LES MORTIERS AVEC ADJUVANTS (SP) ET LES MORTIERS SANS ADJUVANTS (SSP).....	67
III.8	CONCLUSION.....	71

CHAPITRE IV

Effets des Additions Minérales sur les Bétons

IV.1	INTRODUCTION.....	74
IV.2	FORMULATION DES BETONS.....	74
IV.3	MISE EN ŒUVRE DES BETONS AVEC ADDITION.....	74
IV.4	EFFET DES ADDITIONS SUR LES PROPRIETES DE BETON FRAIS.....	76
IV.4.1	Effet des additions sur l'ouvrabilité des bétons	76
IV.4.2	Effet des additions sur le besoin en adjuvant des bétons.....	77

IV.4.3	Effet des additions sur la compacité des bétons.....	78
IV.5 EFFET DES ADDITIONS SUR LES PERFORMANCES MECANIQUES DES BETONS.....		
IV.5.1	Effets des additions sur la résistance à la traction par flexion des bétons.....	79
IV.5.2	Effets des additions sur la résistances en compression des bétons	81
IV.5.3	Corrélation entre la résistance à la traction et la résistance en compression.....	82
IV.5.4	Effet des additions sur la vitesse du son des bétons.....	84
IV.6 CONCLUSION.....		87

CHAPITRE V

Effet des Additions sur la Réaction Alkali-Silice des mortiers

V.1 INTRODUCTION.....		90
V.2 CHOIX DES GRANULATS ET DE LA METHODE D'ESSAI.....		90
V.3 FORMULATION DES MORTIERS.....		90
V.4 EFFET DES ADDITIONS SUR LES VARIATIONS PONDÉRABLES ET DIMENSIONNELLES DES MORTIERS AFFECTES.....		93
V.5 EFFET DES ADDITIONS SUR LA FISSURATION DES MORTIERS AFFECTES.....		96
V.6 CORRÉLATION FISSURATION/VARIATION DIMENSIONNELLE DES MORTIERS.....		97
V.7 EFFET DES ADDITIONS SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DES MORTIERS AFFECTES.....		98
V.7.1	Effet des additions sur les courbes (σ - ϵ) des mortiers affectés.....	98
V.7.2	Effet des additions sur la résistance à la traction des mortiers affectés	102
V.7.3	Effet des additions sur la résistance en compression des mortiers affectés	105
V.7.4	Effet des additions sur le module d'élasticité des mortiers affectés.....	107
V.8 CORRELATION ENTRE LA VARIATION DIMENSIONNELLE ET LA PERTE DES RESISTANCES.....		110
V.9 CONCLUSION.....		112

CHAPITRE VI

Effet des Additions sur la Réaction Alkali-Silice des Bétons

VI.1 INTRODUCTION.....		115
VI.2 FORMULATION ET MISE EN ŒUVRE DES BETONS.....		115
VI.2.1	Dosage en ciment et en alcalins.....	115
VI.2.2	Dosage en eau et en adjuvant.....	116

VI.2.3	Nature et quantité de granulats.....	116
VI.3	EFFET DES ADDITIONS SUR LES PROPRIETES DU BETON FRAIS.....	117
VI.4	EFFET DES ADDITIONS SUR LES VARIATIONS PONDERALES ET DIMENSIONNELLES DES BETONS AFFECTES.....	120
VI.4.1	Béton de granulat non-réactif (C0 %).....	124
VI.4.2	Béton de granulat réactif sans additions (V0 %).....	124
VI.4.3	Bétons avec 10 % d'additions minérales	124
VI.4.4	Bétons avec 20 % d'additions minérales	125
VI.4.5	Bétons avec 30 % d'additions minérales	125
VI.5	EFFET DES ADDITIONS SUR LA FISSURATION DES BETONS AFFECTES.....	125
VI.6	EFFET DES ADDITIONS SUR LES PERFORMANCES MECANIQUES DES BETONS AFFECTES.....	128
VI.6.1	Effet des additions sur la vitesse des impulsions ultrasonores.....	128
VI.6.2	Effet des additions sur les résistances des bétons affectés.....	131
VI.6.3	Facteurs influençants sur les résistances mécaniques.....	136
VI.6.3.1	Influence de la composition du béton	137
VI.6.3.2	Influence multifactorielle du traitement des bétons	137
VI.7	CONCLUSION.....	140
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	143	
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	147	

Liste des Figures

Figure I . 1. Exemples de dommages occasionnés par la RAS [Larive,97]	21
Figure II. 1. Courbes granulométriques des granulats.....	39
Figure II. 2. Mesure de l'étalement des mortiers à l'état frais	42
Figure II. 3. Dispositif avec comparateur pour la mesure de la longueur des éprouvettes.....	42
Figure II. 4. Autoclave (XP P 18-594).	42
Figure II. 5. Essai de traction par flexion sur mortier.....	43
Figure II. 6. Essai de compression sur mortier	43
Figure II. 7. Lunette micrométrique pour mesure de largeur de fissure.....	44
Figure II. 8. Essai de traction par flexion sur les bétons.....	45
Figure II. 9. Essai de compression sur les bétons.....	45
Figure III. 1. Effet des additions minérales sur la consistance normale des pâtes du liant.....	50
Figure III. 2. Effet des additions minérales sur le temps de la prise des pâtes de liant	51
Figure III. 3. Variation de la compacité des mortiers à l'état frais, à même consistance.....	53
Figure III. 4. Variation de l'étalement sur la table à secousses des mortiers frais.....	54
Figure III. 5. Variation du besoin en eau des mortiers à même consistance	55
Figure III. 6. Courbes contraintes-déformations en traction par flexion des mortiers sans adjuvants (SSP) avec différents taux de substitution de ciment par les additions à 7 et à 28 jours.	58
Figure III. 7. Variation des performances mécaniques à 7 et à 28 jours des mortiers sans adjuvants (SSP), en fonction du taux de substitution du ciment par les additions.....	60
Figure III. 8. Corrélation entre les résistances en compression et les résistances à la traction à 7 et à 28 jours, des mortiers sans adjuvants avec des additions.	62
Figure III. 9. Variation du besoin en adjuvant des mortiers avec additions à même consistance, en fonction du taux de substitution du ciment.....	64
Figure III. 10. Variation des performances mécaniques à 7 jours et à 28 jours des mortiers avec adjuvant en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales.....	66
Figure III. 11. Corrélation entre les performances mécaniques à 7 et 28 jours des mortiers avec superplastifiant et des mortiers sans superplastifiant.....	68
Figure III. 12. Ecart des performances mécaniques à 7 et à 28 jours des mortiers avec et sans superplastifiant, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions.	70
Figure IV. 1. Variation de l'affaissement au cône d'Abrams des bétons GCC et GVR, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales.....	76
Figure IV. 2. Variation du besoin en adjuvant des bétons GCC-SP et GVR-SP avec additions à même ouvrabilité en fonction du taux de substitution du ciment.....	77
Figure IV. 3. Variation de la compacité des bétons GCC-SP et GVR-SP à une ouvrabilité constante en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales	78
Figure IV. 4. Variation de la résistance à la traction par flexion à 7 et à 28 jours des bétons GCC-SP et GVR-SP, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition	80
Figure IV. 5. Variation de la résistance en compression à 7 et à 28 jours des bétons GCC-SP et GVR-SP, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.	81
Figure IV. 6. Corrélation entre les résistances en compression et les résistances à la traction à 7 et à 28 jours, des bétons GCC-SP et GVR-SP avec additions minérales.....	83
Figure IV. 7. Vitesse de propagation des ultrasons UPV à 7 et à 28 jours, des bétons GCC-SP et GVR-SP avec additions minérales.....	84
Figure IV. 8. Corrélation entre les résistances en compression et la vitesse de propagation des ultrasons UPV à 7 et à 28 jours, des bétons GCC-SP et GVR-SP avec additions minérales.....	86

Figure V. 1. Effet des additions sur les variations pondérales des mortiers.....	94
Figure V. 2. Effet des additions sur les variations dimensionnelles des mortiers.....	94
Figure V. 3. Réduction des variations dimensionnelles par les additions.....	95
Figure V. 4. Corrélation entre les variations dimensionnelles et les variations pondérales des mortiers.....	95
Figure V. 5. Fissuration des différents mortiers.....	96
Figure V. 6. Corrélation entre fissuration/variation dimensionnelle des mortiers.....	97
Figure V. 7. Comparaison des courbes contraintes-déformations en traction par flexion des mortiers....	101
Figure V. 8. Variation des résistances à la traction à 28 jours et après l'essai accéléré par autoclave des mortiers.....	103
Figure V. 9. Variation des pertes des résistances à la traction due à la RAS des mortiers.....	104
Figure V. 10. Variation des résistances en compression à 28 jours et après l'essai accéléré par autoclave des mortiers de verre recyclé en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.	105
Figure V. 11. Variation des pertes des résistances en compression due à la RAS des mortiers de verre recyclé en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.....	107
Figure V. 12. Variation des modules d'élasticité à 28 jours et après l'essai accéléré par autoclave des mortiers de verre recyclé en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.	108
Figure V. 13. Variation des pertes des modules d'élasticité due à la RAS des mortiers de verre recyclé...	109
Figure V. 14. Corrélation entre la perte des résistances à la traction et la perte des résistances en compression.	110
Figure V. 15. Corrélation entre la variation dimensionnelle et la perte des résistances.	110
Figure VI. 1. Effet des additions minérales sur les propriétés des bétons frais.	118
Figure VI. 2. Variations pondérales des éprouvettes de béton, en fonction du temps.....	121
Figure VI. 3. Variations dimensionnelles des éprouvettes de béton, en fonction du temps.....	122
Figure VI. 4. Réduction des variations dimensionnelles par les additions minérales.....	123
Figure VI. 5. Corrélation entre les variations dimensionnelles et les variations pondérales des bétons ...	123
Figure VI. 6. Activité préventive des additions minérales sur l'expansion de la RAS	123
Figure VI. 7. Allure des courbes de variation dimensionnelle	123
Figure VI. 8. Fissuration de surface des différentes éprouvettes de béton.....	126
Figure VI. 9. Corrélation fissuration/variation dimensionnelle des bétons.....	127
Figure VI. 10. Variation de la vitesse de propagation des ultrasons des bétons.	129
Figure VI. 11. Corrélation entre l'expansion et la vitesse des impulsions des bétons.....	130
Figure VI. 12. Variation de la résistance à la traction par flexion des bétons.....	131
Figure VI. 13. Variation de la résistance en compression, en fonction du temps.	132
Figure VI. 14. Corrélation entre les résistances mécaniques et le gonflement des bétons.	134
Figure VI. 15. Variation de la perte des résistances due à la RAS des bétons.....	135
Figure VI. 16. Réduction des résistances due à la RAS (et augmentation due à la RPz).....	138

Liste des Tableaux

Tableau I. 1. Composition chimique moyenne du clinker [Taylor. 1997].....	8
Tableau I. 2. Composition minéralogique moyenne du clinker [Stutzman. P., 2004].....	8
Tableau I. 3. Composition chimique du laitier granulé [Hwang. CL., et Lin. CY., 1986].....	10
Tableau I. 4. Caractéristiques physiques typiques de la fumée de silice [Yazici. 2008]	13
Tableau I. 5. Composition chimique des fumées de silice [Sandvik et al. 1992], [Hooton et al. 2004] et [Yazici. 2008].....	13
Tableau I. 6. Composition typique des verres creux [Shao et al. 2000], [Idir et al. 2010].....	18
Tableau II. 1. Caractéristiques physiques, composition chimique et minéralogique du ciment	36
Tableau II. 2. Caractéristiques physiques des additions minérales	36
Tableau II. 3. Compositions chimiques des additions minérales.....	36
Tableau II. 4. Caractéristiques du superplastifiant utilisé.....	38
Tableau II. 5. Caractéristique des granulats.....	40
Tableau II. 6. Pourcentage des différentes classes granulaires constituant le sable.....	42
Tableau III. 1. Composition des mortiers sans adjuvant	52
Tableau III. 2. Composition des mortiers avec adjuvant	63
Tableau IV. 1. Appellation des différents mélanges de bétons.....	75
Tableau IV. 2. Formulations des différents mélanges de bétons.....	75
Tableau V. 1. Répartition des granulats utilisés dans l'essai d'autoclavage.....	90
Tableau V. 2. Bilan des alcalins.	91
Tableau V. 3. Appellations des différents mélanges de mortier	92
Tableau V. 4. Composition des mortiers (quantités pour 3 éprouvettes 4x4x16 cm).....	93
Tableau V. 5. Largeur et densité de fissuration des différents mortiers.	97
Tableau VI. 1. Appellations des différents mélanges de béton.....	116
Tableau VI. 2. Composition de 1 m ³ des différents types de béton.....	117
Tableau VI. 3. Temps nécessaire pour atteindre 80 % de l'expansion finale.....	120
Tableau VI. 4. Valeurs caractéristiques des courbes d'expansion des bétons.....	123
Tableau VI. 5. Largeur et densité de fissuration des différents bétons.	127
Tableau VI. 6. Résistances mécaniques des bétons R _b (MPa).....	137
Tableau VI. 7. Différentes valeurs de résistances mécaniques des bétons Δ R _m (MPa).....	137
Tableau VI. 8. Valeurs de ΔR _{AS} , ΔR _{Pz} et ΔT°	137

GLOSSAIRE

C-S-H : Silicates de calcium hydratés

NR : Non Réactif

PR : Potentiellement Réactif

PRP : Potentiellement Réactif à effet de Pessimum

AFNOR : Association Française de Normalisation

ASTM : American Standards of Testing Materials

BS : British Standards

EN : Européen Norme

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

R.A.S : Réaction Alkali Silice

MEB : Microscope Electronique à Balayage

La : Laitier granulé de hauts fourneaux

Pz : Pouzzolane naturelle

Fs : Fumée de silice

Fc : Filler calcaire

Pv : Poudre de verre

GVR : Granulats de verre recyclé

GCC : Granulats calcaires concassés

SP : Superplastifiant

SN : Sable Normalisé

UPV : Ultrasonic Pulse Velocity- vitesse d'impulsion ultrasonique

Δm : Variations pondérales

Δl : Variations dimensionnelles

LF : Largeur de fissure (mm).

DF : Densité de fissure (mm/cm²).

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1-Cadre de l'étude

La construction est responsable de 5 % à 10 % des rejets mondiaux de dioxyde de carbone [Habert et al. 2010, Damtoft et al. 2008]. Afin de réduire l'empreinte carbone du secteur, il est nécessaire de se pencher sur l'origine de ces rejets.

Le CO₂ rejeté par le secteur de la construction est imputé premièrement à la production de ciment à hauteur de 95 %, on estime que pour une tonne de clinker 0.8 à 0.9 tonnes de CO₂ sont produites. Les deux sources majeures étant la décarbonatation du calcaire et la production d'énergie par des combustibles fossiles [Ellis 2004, Habert et al. 2010].

De nombreuses solutions sont déjà mises en place afin de réduire les émissions de CO₂ lors de la production du ciment, en particulier :

- l'utilisation de combustibles alternatifs non carbonatés en substitution des combustibles fossiles.
- l'utilisation de sous-produits d'autres industries (laitiers de haut fourneau, cendres volantes, fumées de silice) associés au clinker permet d'offrir une large gamme des ciments aux propriétés et utilisations très variées.

Après le ciment, les seconds constituants du béton sont les granulats. Les ressources en granulats « nobles » tendent à se raréfier compte tenu de l'épuisement des ressources naturelles, de la difficulté pour ouvrir de nouvelles carrières et de l'éloignement entre les lieux d'extraction et les lieux d'exploitation des granulats. De nombreux sous-produits de consommation, ou d'activités industrielles, sont aujourd'hui à l'étude dans l'optique d'une utilisation en tant que source de granulats, c'est par exemple le cas des déchets de verre.

Quels que soit le mode d'utilisation des sous-produits industriels (en tant que granulats ou en tant qu'additions minérales en substitution du ciment). Les bétons résultants doivent présenter un impact limité sur l'ouvrabilité et ne nuire ni à l'hydratation ni au développement des propriétés mécaniques. De même les aspects de durabilité doivent être conservés voire développés. Une addition minérale ne doit pas favoriser les réactions secondaires néfastes pour le matériau, comme la réaction alcali-silice.

La réaction alcali-silice (RAS) est un mécanisme qui conduit à l'exsudation de gel qui gonfle et provoque des microfissures. La formation de la réaction alcali-silice (RAS) nécessite la présence simultanée de trois conditions à température ambiante : une quantité suffisante d'alcalins dans la solution interstitielle, des granulats réactifs et une humidité relative supérieure à 85 %. L'ampleur de la détérioration induite par la réaction alcali-silice (RAS) est influencée notamment par la réactivité, la quantité, la taille et la granulométrie des granulats réactifs, la quantité d'alcalins disponibles, la porosité du matériau et la préexistence de microfissures. Plusieurs types de désordres tels que l'expansion, les déplacements différentiels, les exsudations de gel, la chute des

propriétés mécaniques, peuvent être observés dans les structures touchées par la réaction alcali-silice (RAS) [Fernandes et Broekmans 2013], [Thomas et al. 2013], [Riche 2003], [Bouzabata et Houari 2008] et [Gao 2010 Poyet 2003].

Plusieurs solutions ont été proposées pour atténuer ou prévenir la réaction alcali-silice (RAS). L'utilisation des additions minérales s'est grandement développée au cours des dernières années. Les cendres volantes, les fumées de silice, les laitiers de hauts fourneaux, le métakaolin et les pouzzolanes naturelles et artificielles, sont maintenant des produits reconnus pour leur efficacité à contrer les effets néfastes de la réaction alcali-silice (RAS) [Douaïssia et Merzoud 2018], [Davraz et Gunduz 2008], [Kwon 2005], [Bouikni et al 2009], [Shafaatian et al 2013], [Kandasamy et Shehata 2014], [Moisson 2005] et [Siddique et Khan 2011].

2- Méthode de la recherche

Lors d'une valorisation des sous-produits dans les matériaux cimentaires, on recherche généralement trois types de réactivité :

- **hydraulique** : caractérisée par un durcissement en présence d'eau, la réaction nécessite parfois une activation (généralement par le pH).
- **pouzzolanique** : définie comme la capacité de durcir par réaction entre la silice réactive et la chaux en milieu aqueux, produisant des C-S-H additionnels.
- **chimiquement inerte** : ne présente pas de réactivité chimique, mais augmente la compacité de l'empilement granulaire en remplissant les vides inter-granulaires. De plus, les fines inertes peuvent agir comme sites de nucléation pour l'hydratation du ciment [Lawrence et al. 2003, Lawrence 2000, Moosberg-Bustnes et al. 2004].

Le développement de notre recherche sur l'utilisation des additions minérales pour l'amélioration des propriétés mécaniques et la prévention de la réaction alcali-silice (RAS) des bétons, a été faite en plusieurs étapes :

La première étape consiste à caractériser les propriétés physico-chimiques du matériau brut. Le matériau peut éventuellement nécessiter des traitements (thermique, broyage, stabilisation...), afin de promouvoir son potentiel de valorisation.

La seconde étape concerne l'évaluation des propriétés physiques et mécaniques des pâtes de ciment et des mortiers normalisés avec l'incorporation d'additions alternatives. Selon les résultats obtenus, le potentiel de valorisation sera déterminé, il dépend de la fraction granulométrique la plus adéquate. La finesse joue un rôle prépondérant aussi bien sur les propriétés à l'état frais que durci. Augmenter la finesse peut ainsi augmenter la réactivité d'une addition, améliorer la compacité de l'empilement granulaire et améliorer l'hydratation au jeune âge. Il peut aussi s'en suivre une augmentation de la demande en eau avec l'augmentation de la surface spécifique, ou l'ouverture de nouveaux pores. Il peut ainsi être utile de broyer le matériau ou de sélectionner une fraction granulaire spécifique.

Pour la troisième étape, les additions alternatives doivent être caractérisées en comparaison avec les spécificités des additions cimentaires normalisées (cendres volantes, laitiers, fumées de silice, pouzzolanes naturelles).

La quatrième étape consiste à caractériser l'effet des additions alternatives sur les bétons, et de le comparer à celui des additions cimentaires normalisées. La campagne de caractérisation doit inclure des essais portant sur la compatibilité avec les adjuvants, les propriétés du béton à l'état frais (ouvrabilité, temps de prise, densité) et les propriétés du béton durci (résistance en flexion, résistance en compression).

Dans le cas où l'addition présente des propriétés intéressantes, la dernière étape consiste à vérifier l'effet des additions alternatives vis-à-vis de la réaction alcali-silice (RAS), et à évaluer leurs performances à contrer leur effet néfaste sur des mortiers et des bétons. On les compare avec des additions cimentaires normalisées. Cette étape permet de confirmer les performances et de suivre la durabilité à long terme des bétons avec des additions alternatives.

3- Objectifs de la thèse

Pour continuer à réduire la part de CO₂ provenant des matières premières, à travers l'utilisation des matériaux alternatifs en tant que source de granulats ou comme substituant du ciment, trois possibilités peuvent être envisagées :

- Étendre la liste des additions minérales approuvées par les normes.
- Étendre les normes sur des formulations plus complexes (mélanges binaires, ternaires, quaternaires)
- Développer une méthodologie scientifique facilitant la formulation de mélanges pour une performance optimale.

4- Organisation du mémoire

Le sujet de cette recherche porte sur l'étude des caractéristiques physico-mécaniques et de la durabilité, vis-à-vis de la réaction alcali-silice, des bétons confectionnés à partir de nouveaux liants hydrauliques composés d'un ciment portland en combinaison avec plusieurs additions minérales naturelles ou sous-produits industriels locaux (Laitier granulé de haut fourneau, pouzzolane naturelle, fumée de silice, filler calcaire et poudre de verre).

Notre mémoire est divisé en six chapitres ;

Le premier chapitre propose une revue de la documentation scientifique se rapportant à la substitution du ciment Portland par des additions minérales, en mettant en évidence leur effet sur les variations des propriétés physico-mécaniques des bétons, ainsi que leur effet bénéfique sur la maîtrise de la réaction alcali-silice (RAS).

Le second chapitre décrit, les conditions de l'étude paramétrique entreprise, les additions minérales étudiées ont été caractérisées du point de vue physico-chimique.

Le troisième chapitre présente les résultats obtenus par des essais physiques et mécaniques sur des pâtes et des mortiers normalisés avec additions minérales. Bien que présentant un intérêt industriel moindre que les bétons, les mortiers permettent de réaliser des tests sur des volumes plus petits et donc de multiplier les conditions d'essais.

Le quatrième chapitre est consacré aux résultats obtenus par des essais physiques et mécaniques sur des bétons avec additions minérales, en décidant de valoriser des sous-produits en tant que granulats. Deux granulats sont utilisés, un granulat calcaire concassé et un granulat verre recyclé.

Le cinquième chapitre met en évidence l'efficacité des additions minérales à contrer la réaction alcali-silice (RAS) dans des mortiers à base de granulat réactif (verre recyclé), en les appliquant un test accéléré par autoclave selon la norme NF P 18 590.

Le sixième chapitre permet de vérifier l'efficacité des additions minérales à inhiber les effets néfastes de la réaction alcali-silice (RAS) dans des bétons à base de granulat réactif (verre recyclé), où les bétons ont été placés en réacteur suivant la norme NF P 18 454 et le fascicule d'application FD P 18-456, qui ont servi de cadre expérimental même si certaines contraintes pratiques ont nécessité quelques aménagements indispensables.

Enfin le mémoire s'achève par une conclusion ouvrant des perspectives d'études restant à mener dans le domaine de la valorisation des matériaux en tant qu' additions minérales et/ou granulat, en général et de la maîtrise de la durabilité en particulier.

CHAPITRE I
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

Revue Bibliographique

I.1	INTRODUCTION	8
I.2	LE CIMENT PORTLAND	8
I.2.1	Définition du ciment	8
I.2.2	Hydratation du ciment portland.....	8
I.2.3	Types de ciments	9
I.3	CIMENT PORTLAND AU LAITIER	10
I.3.1	Le laitier de haut fourneau.....	10
I.3.2	Hydratation des ciments Portland au laitier.....	10
I.3.3	Caractéristiques des ciments et des bétons à base de laitier.....	11
I.4	CIMENT PORTLAND AUX POUZZOLANES	12
I.4.1	Les pouzzolanes naturelles	12
I.4.2	Hydratation des ciments pouzzolaniques.....	12
I.4.3	Caractéristiques des ciments et des bétons à base de pouzzolane	12
I.5	CIMENT PORTLAND A LA FUMÉE DE SILICE	13
I.5.1	La fumée de silice.....	13
I.5.2	Hydratation des ciments aux fumées de silice.....	14
I.5.3	Caractéristiques des ciments et des bétons à base de la fumée de silice	14
I.6	CIMENT PORTLAND AUX CALCAIRES	15
I.6.1	Les fillers calcaires.....	15
I.6.2	L'hydratation des ciments aux fillers calcaires.....	15
I.6.3	Caractéristiques des ciments et des bétons aux fillers calcaires.....	16
I.7	CIMENT PORTLAND AUX POUDDRES DE VERRE	18
I.7.1	Le verre.....	18
I.7.2	Caractéristiques des ciments et des bétons avec de la poudre de verre	18
I.8	UTILISATION DU VERRE EN TANT QUE GRANULAT	19
I.8.1	Effet du granulats de verre sur les propriétés à l'état frais des bétons.....	19
I.8.2	Effet du granulats de verre sur les propriétés à l'état durci des bétons	19
I.9	LA REACTION ALCALI-SILICE	20
I.9.1	Définition de la réaction alcali- silice	20
I.9.2	Les granulats de verre et la réaction alcali- silice.....	21
I.9.3	Effet des additions minérales sur la réaction alcali-silice.....	22
I.9.4	Mécanismes d'action des additions minérales sur la RAS	29
I.10	CONCLUSION	31

CHAPITRE I

Revue Bibliographique

I. 1. INTRODUCTION

L'objectif de cette revue bibliographique est de faire le point des connaissances actuelles sur l'action des additions minérales dans les matériaux cimentaires. Elle est alors entreprise en rappelant d'abord les propriétés du ciment Portland, en mettant ensuite en évidence les effets du laitier granulé, pouzzolane naturelle, fumée de silice, filler calcaire et poudre de verre sur les propriétés physico-mécaniques des bétons. Elle se termine par l'effet bénéfique de l'emploi de ces additions minérales sur la maîtrise de la réaction alcali-silice.

I. 2. LE CIMENT PORTLAND

I. 2. 1. Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui, mélangé avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le ciment est fabriqué à partir du clinker, obtenu par la combinaison chimique à très hautes températures (1450 °C) de calcaire (80 %) et d'argile (20 %). Sa fabrication peut être réalisée selon quatre méthodes : par voie humide, semi-humide, sèche (la plus courante) et semi-sèche. La composition chimique moyenne du clinker est présentée dans le tableau I. 1.

Tableau I. 1. Composition chimique moyenne du clinker [Taylor. 1997]

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
%	19-25	2-9	1-5	62-67	0-3	1-3	0.6	0.2

La composition minéralogique moyenne du clinker est présentée dans le tableau I. 2. Parmi ces quatre composants, ce sont surtout les silicates de calcium (C₃S et C₂S) qui génèrent les performances mécaniques.

Tableau I. 2. Composition minéralogique moyenne du clinker [Stutzman. P., 2004]

Minéral	Alite C ₃ S	Bélite C ₂ S	Célite C ₃ A	Célite C ₄ AF
%	60-65	10-20	8-12	8-10

I. 2. 2. Hydratation du ciment portland

La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment C₃S, C₂S, C₃A, et C₄AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau.

Hydratation des silicates : au contact de l'eau, les silicates tricalciques (Ca₃SiO₅) et les silicates bicalciques (Ca₂SiO₄) 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). Ces réactions sont

exothermiques. Dans le cas du C_2S , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible. Les C-S-H sont des composés non cristallins, ils ont les caractéristiques d'un gel.

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 et l'hydratation ralentit de plus en plus.

Hydratation des aluminates : 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

Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite (trisulfoaluminate de calcium hydraté) : $((CaO)_6 (Al_2O_3)(SO_3)_3, 32H_2O)$. Cette réaction est fortement exothermique.

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 : $((CaO)_3(Al_2O_3)(CaSO_4), 12H_2O)$.

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'aluminoferrite (C_4AF) pour former de l'aluminoferrite de calcium hydraté. Même si les séquences réactionnelles sont proches du C_3A , l'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF) est nettement plus lent à réagir et n'apparaît de manière significative qu'une fois que le gypse est totalement épuisé.

I. 2.3.Types de ciments

Il existe cinq types de ciment normés « CEM ». Cette désignation caractérise un ciment conforme à la norme européenne EN 197-1. Les ciments CEM sont constitués de différents matériaux et sont de composition statistiquement homogène.

Le CEM I désigne un ciment de type « ciment Portland », c'est-à-dire un ciment composé d'un minimum de 95 % de clinker. CEM II : cette désignation caractérise des ciments dont les plus courants sont le « ciment Portland composé », le « ciment Portland au calcaire », le « ciment Portland au laitier » ou le « ciment Portland à la fumée de silice ». Les ciments CEM III sont des ciments du type « ciment de haut fourneau » constitué de clinker et de laitier de haut fourneau, dans des proportions alternatives. Le CEM IV désigne le « ciment pouzzolanique » et le CEM V désigne le « ciment composé ».

Le nombre de types de ciments est passé à dix à partir de 1994 avec l'évolution de la norme NF EN 197-1. Aujourd'hui, on peut compter vingt-sept types de ciments courants.

I. 3. CIMENT PORTLAND AU LAITIER

Les ciments Portland au laitier sont composés de clinker (minimum 65 %) et de laitier granulé de haut fourneau (maximum 30 %).

I. 3. 1. Le laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de l'industrie métallurgique. Il est constitué de silico-aluminate de chaux, il résulte de la réduction du minerai de fer dans le processus de fabrication de la fonte. Le laitier granulé possède des caractéristiques intéressantes en tant que constituant principal du ciment et en tant qu'addition minérale selon les normes EN 197 - 1 et P 18 - 506. En Algérie, son taux de remplacement de ciment est limité entre 15 à 20 %, et il doit avoir la composition chimique suivante (tableau I. 3) :

Tableau I. 3. Composition chimique du laitier granulé [Hwang. CL., et Lin. CY., 1986].

Eléments principaux	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	S*	SO ₃ **
Teneur en (%)	40-48	29-36	13-19	< à 4	< à 6	< à 2	< à 2	< à 0.5

* Soufre des sulfures, exprimé en S.

** Soufre des sulfates, exprimé en SO₃.

La composition chimique est importante dans l'évaluation des propriétés hydrauliques, elle détermine la basicité du laitier ainsi que sa structure vitreuse. Il est à préciser que plus le laitier est basique, plus son pouvoir hydraulique est élevé. Cependant, la présence de l'oxyde de fer dans le laitier fondu faciliterait la granulation, mais abaisserait le pouvoir hydraulique.

I. 3. 2. Hydratation des ciments Portland au laitier

Les laitiers sont composés de mêmes principaux oxydes que le ciment Portland, mais des proportions et compositions minéralogiques différentes. La principale différence réside dans la proportion relative en oxydes, lesquels se combinent pour produire le C-S-H composé le plus souvent du ciment hydraté. Dans la phase initiale, ce sont les éléments structuraux les plus basiques qui passent en solution (Si₂O₇)₆₋ ou Al(OH)₄⁻. Le rapport C/S du C-S-H étant plus faible que celui du laitier, la solution devient plus riche en chaux. L'alcalinité du milieu et la concentration en ion Ca⁺⁺ entraînent l'hydratation des silicates, des alumino-silicates et des aluminates de calcium. De plus, elles entraînent l'intensification du processus de destruction des liaisons covalentes [Hwang. CL., et Lin. CY., 1986]. Dans les ciments Portland aux laitiers, l'activant est le clinker qui apporte de la chaux nécessaire à la formation des hydrates stables. Par conséquent, l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ est produit durant l'hydratation du clinker. Il est la source principale d'alcalinité pour l'activité hydraulique et pour la réaction avec le SiO₂ du laitier. Il se forme des C-S-H semblables à ceux qui proviennent de l'hydratation du clinker. Ainsi, il faut noter que la teneur en Ca(OH)₂ décroît avec l'augmentation de la teneur en laitier.

En effet, les travaux de recherche effectués par Dron [Dron. R., 1974] et Regourd [Regourd. M., 1986] affirment que la cinétique d'hydratation des ciments aux laitiers s'effectue en deux phases :

- la première phase, très rapide, est due à la réaction des alcalins (CaO, K₂O et Na₂O) produits par l'hydratation du clinker.
- la deuxième phase très lente est due aux réactions de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ lors de l'hydratation du laitier.

L'hydratation du laitier produit principalement des C-S-H, des aluminates et des silico-aluminates de calcium hydratés. Elle ne produit pas de Portlandite, il semble même qu'une partie de la Portlandite provenant de l'hydratation du ciment portland soit consommée dans un processus réactif du type pouzzolanique [Maltais. Y., 1996].

Le pouvoir hydraulique des laitiers granulés vitreux est à l'état latent. Il suffit des catalyseurs pour amorcer les réactions d'hydratation. Parmi ces catalyseurs, se trouvent les bases fortes comme la soude et la chaux. Ainsi, le laitier mélangé à du CEM I sera catalysé par la chaux provenant de l'hydratation de ce ciment. Il est intéressant de noter qu'il est possible d'activer les ciments aux laitiers par étuvage (traitement thermique) [Hwang. CL., et Lin. CY., 1986]. L'étuvage ou l'activation thermique induit une forte accélération de l'hydratation des ciments aux laitiers à court terme (jeunes âges) et une réduction de l'accroissement de résistance à long terme.

L'activité d'hydratation des ciments à base de laitier peut être décrite par les réactions chimiques suivantes :



Ces réactions confirment la propriété latente de l'hydratation du laitier nécessitant l'emploi d'un bon activant chimique, thermique ou mécanique [Nacéri. A., et Benia. M., 2006] et [Barnett. S.J., et al, 2006].

I. 3. 3. Caractéristiques des ciments et des bétons à base de laitier

Le ciment et le béton utilisant le laitier présentent de nombreuses caractéristiques favorables. Les ciments de laitier ont des temps de prise un peu plus longs que les ciments Portland sans ajouts. En effet, le laitier a un effet retardateur de prise [Brooks, J., et al. 2000], ce qui influence la résistance à court terme du béton. Les résistances aux premiers jours sont moins élevées que pour les ciments Portland sans ajouts, mais cet effet s'atténue souvent à long terme. Les ciments aux laitiers conservés humides présentent de très fortes résistances finales [Dubosc. A., 1998].

Le béton fabriqué avec le laitier se caractérise par l'amélioration de la maniabilité et de la durabilité [Tikalsky. P., et Freeman. R.L., 1998], une faible chaleur d'hydratation et une résistance accrue aux sulfates et aux acides. Leur emploi sera donc privilégié dans certains cas : béton de masse, bétonnage par temps chaud et dans les milieux agressifs. Les laitiers ont été jusqu'à présent utilisés à des dosages variant entre 15 et 30 % [Nacéri. A., Messaoudene. I., 2006]. Cependant, dans le futur, on utilisera très certainement des dosages en laitier supérieurs. Un essai de chantier dans une centrale à béton [Baalbaki. W., et al. 1992] a conduit à un BHP avec une résistance à la compression à 91 jours de 130 MPa. Le liant était composé de 60 % de laitier, 30 % de ciment portland et 10 % de fumée de silice. Le laitier de hauts fourneaux offre aux BHP une certaine maniabilité, tandis que la fumée de silice reste le meilleur ajout qui offre une grande maniabilité au béton [Park, C.K., et al. 2005].

I. 4. CIMENT PORTLAND AUX POUZZOLANES

Les ciments Portland aux pouzzolanes sont composés de clinker (minimum 65 %) et de pouzzolane (maximum 30 %).

I. 4. 1. Les pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes naturelles sont des substances d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires, ayant une composition chimique et minéralogique appropriée. Les argiles calcinées constituent, elles aussi, des pouzzolanes naturelles calcinées, appelées pouzzolanes artificielles. Un matériau pouzzolanique est pauvre en oxyde de calcium, et en présence de ce dernier avec de l'eau, fait prise et durcit à température ordinaire [Semcha. A., 2006].

Ainsi pour acquérir des propriétés mécaniques, le matériau pouzzolanique doit consommer de l'oxyde de calcium. L'activité pouzzolanique définit les phénomènes qui, à température ordinaire, transforment en un temps raisonnable les mélanges de pouzzolanes, de chaux et d'eau en matériaux durs et compacts. C'est à leur haute teneur en constituants acides, silice et alumine, que les pouzzolanes doivent cette propriété [Dron, R., 1974].

I. 4. 2. Hydratation des ciments pouzzolaniques

Les pouzzolanes naturelles peuvent être utilisées en tant que constituant principal du ciment [EN 197-1] et en tant qu'addition minérale [NF P 18-308]. Les pouzzolanes doivent être composées essentiellement de SiO₂ réactif et d'Al₂O₃. La partie restante contient de l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et d'autres oxydes. La proportion de CaO réactif est négligeable vis-à-vis du durcissement. La teneur en SiO₂ réactif doit être au moins égale à 25 % en masse.

Ces ciments sont des mélanges de clinker portland et de pouzzolanes dont les proportions doivent être telles que la chaux libérée lors de l'hydratation du clinker corresponde aussi exactement que possible à la quantité qui peut se combiner avec la pouzzolane.

A priori l'hydratation du CEM I libère de la chaux à raison de 20 à 25 % de son poids, la substitution de pouzzolane est envisagée dans les mêmes proportions [Semcha. A., 2006]. L'étude de l'évolution chimique des hydrates formés montre qu'il y a d'abord hydratation du clinker et formation de portlandite, ensuite réaction pouzzolanique :



I. 4. 3. Caractéristiques des ciments et des bétons à base de pouzzolane

Les ciments pouzzolaniques ont des performances plus recherchées que celles du ciment Portland du fait de leur porosité, la plupart du temps plus faible et donc un meilleur comportement vis-à-vis de leur durabilité. Ces ciments sont caractérisés par une basicité plus faible, due à la consommation de la chaux, et par des résistances mécaniques finales comparables à celles des ciments Portland. Plusieurs études Massazza [Massazza. F., 1993], Kouloumbi, N., Batis, G., et Pantasopoulou, P [Kouloumbi, N., et al. 1995], Rodriguez [Rodriguez. C., 1998] et Tagnit-hamou, A., Pertove, N., et Luke, K [Tagnit. H.A., et al. 2003] ont montré que la pouzzolane naturelle a été employée couramment comme un matériau de remplacement pour le ciment Portland dans beaucoup d'applications, en raison de propriétés avantageuses (réduction des coûts, dégagement de chaleur faible, diminution de la perméabilité et résistance chimique accrue).

L'Algérie possède une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique qui s'étend sur 160 km entre la frontière Algéro-Marocaine et le sahel d'Oran (Béni-Saf). Plusieurs travaux de recherche, réalisés sur des mortiers et bétons, Mebrouki, A., Belas Belaribi, N., Bouhamou, N., et Cyr, M. [Mebrouki, A., et al. 2004], Aichouba [Aichouba, A. 2005], Senhadji [Senhadji, Y., 2006], Ghrici [Ghrici, M., 2006] et Kaid, N., Cyr, M., Julien, S., et Khelafi, H. [Kaid, N., et al. 2009] ont montré que le remplacement partiel par la pouzzolane naturelle de Béni-Saf améliore les performances mécaniques et la durabilité. Grâce à l'ajout de pouzzolane ultrafine, l'utilisation de superplastifiant est moyennant une composition correctement ajustée. Chaid, R., Jauberthie, R., Bali, A., et Abadlia, M.T. [Chaid. R., et al., 2004] ont obtenu des bétons de résistance mécanique en compression à 28 jours supérieurs à 50 MPa. De vieilles études américaines sur l'usage de la pouzzolane indiquent déjà que les ciments mélangés à la pouzzolane possèdent des qualités hydrofuges. Celle-ci a servi à la construction du pont Golden Gate de San Francisco.

I. 5. CIMENT PORTLAND A LA FUMÉE DE SILICE

I. 5. 1. La fumée de silice

L'institut Américain de béton (American Concrete Institute) (ACI) définit les fumées de silice comme une « silice non stationnaire très fine produite dans les fours à arc électrique comme un sous-produit de la production de silicium élémentaire ou d'alliages contenant du silicium ». Il s'agit généralement d'une poudre de couleur grise, un peu semblable à du ciment Portland ou quelques cendres volantes. Elle peut présenter à la fois des propriétés pouzzolaniques et cimentaires. Les particules de fumée de silice sont extrêmement petites, avec plus de 95 % des particules plus fines que 1 μm . Le tableau I. 4 présente ses caractéristiques physiques typiques.

Tableau I. 4. Caractéristiques physiques typiques de la fumée de silice [Yazici. 2008]

Propriétés	Valeurs
Particle size (typical)	< 1 μm
Masse volumique apparente	130-430 kg/m ³
Masse volumique absolue	480-720 kg/m ³
Densité	2.22
Surface spécifique (BET)	13.000-30.000 m ² /kg

Le tableau I. 5 présente la composition chimique des fumées de silice rapportées par certains auteurs. Les fumées de silice se composent principalement de silice pure sous forme non cristalline. La fumée de silice a une teneur très élevée en dioxyde de silicium amorphe et on trouve également de petites quantités de fer, de magnésium et d'oxydes alcalins.

Tableau I. 5. Composition chimique des fumées de silice [Sandvik et Gjorv 1992], [Hooton et Titherington 2004] et [Yazici. 2008]

Oxides	[Sandvik et Gjorv 1992]	[Hooton et Titherington 2004]	[Yazici. 2008]
SiO ₂	92.1	96.65	92.26
Al ₂ O ₃	0.5	0.23	0.89
Fe ₂ O ₃	1.4	0.07	1.97
CaO	0.5	0.31	0.49
MgO	0.3	0.04	0.96
K ₂ O	0.7	0.56	1.31
Na ₂ O	0.3	0.15	0.42
SO ₃	-	0.17	0.33
LOI	2.8	2.27	-

I. 5. 2. Hydratation des ciments aux fumées de silice

En raison de sa finesse extrême et de sa teneur très élevée en dioxyde de silicium amorphe, la fumée de silice est un matériau pouzzolanique très réactif. Lorsque le ciment Portland dans le béton commence à réagir chimiquement, il libère de l'hydroxyde de calcium. La fumée de silice réagit avec cet hydroxyde de calcium pour former un liant supplémentaire appelé hydrate de silicate de calcium, très semblable à l'hydrate de silicate de calcium formé à partir de ciment Portland. Il s'agit d'un liant supplémentaire qui confère au béton à fumées de silice ses propriétés améliorées.

I. 5. 3. Caractéristiques des ciments et des bétons à base de la fumée de silice

Rao. G.A. [Rao. G.A. 2003] a déterminé l'influence de la fumée de silice sur la consistance et le temps de prise des pâtes de ciment ainsi que sur l'ouvrabilité des mortiers. La densité et la surface spécifique de la fumée de silice étaient respectivement de 2.05 et 16 000 m²/kg, le taux de la fumée de silice dans les mélanges variaient de 0 à 30 %. Il a observé que la consistance de la pâte de ciment augmente avec l'augmentation du taux de la fumée de silice, en raison de sa grande finesse.

Il a observé aussi que, le temps de début de prise diminuait avec l'augmentation de la teneur en fumée de silice, à 30 % de fumée de silice, le temps de début de prise n'a été que de 30 min. Le temps de fin de prise ne semble pas être influencé par la fumée de silice. L'action pouzzolanique de la fumée de silice semble être très active aux premières heures d'hydratation. Par conséquent, il a conclu que la teneur en fumée de silice se traduit par une prise rapide du ciment.

Il a étudié la variation de l'ouvrabilité (essai de la table à secousses) des mortiers avec différentes teneurs en fumée de silice. Les densités absolues et apparentes du sable étaient respectivement de 2.68 et 1584 kg/m³. Le rapport ciment/sable dans les mortiers était de 1/3 et les rapports E/C étaient de 0.45 et 0.50, il a observé que l'ouvrabilité du mortier a légèrement diminué avec l'augmentation de la teneur en fumée de silice. Cela est dû à la surface spécifique plus élevée de la fumée de silice, qui nécessite plus d'eau pour une hydratation complète et une bonne ouvrabilité.

Huang et Feldman [Huang et Feldman, 1985] ont étudié l'effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression, ils ont conclu que l'ajout de 30% de la fumée de silice entraînait une meilleure liaison entre la matrice de ciment hydraté et le sable, ceci est due à la formation de silicate de calcium hydraté à la surface des grains.

Cong, X., Gong, S., Darwin, D., et McCabe, S.L [Cong et al. 1992], Gleize, P.J.P., Müller, A., et Roman, H.R [Gleize et al. 2003] ont observé que le remplacement du 18 % de ciment par la fumée de silice et l'ajout de superplastifiant augmentaient la résistance à la compression du béton en raison de la modification de l'interface granulat/pâte.

Hooton R.D [Hooton, 1993] a observé que la résistance à la compression des bétons contenant 0, 10, 15 et 20 % de fumée de silice à l'âge de 5 ans, était plus élevée que le béton de ciment Portland. Bhanja, S., Sengupta, B. [Bhanja et Sengupta, 2005] ont étudié l'effet de la fumée de silice sur la résistance à la flexion d'un béton à haute performance. Les taux de fumées de silice étaient 0 - 5 - 10 - 15 - 20 et 25 %. Les résultats ont montré que la fumée de silice avait un effet important sur la résistance à la flexion. Il a été constaté que la résistance à la flexion augmentait régulièrement avec l'augmentation du taux de la fumée de silice.

Köksal, F., Altun, F., Yig'it, I., et Sùahin, Y. [Köksal et al. 2008] ont évalué la résistance à la flexion d'un béton incorporant la fumée de silice et des fibres métalliques. La fumée de silice a été incorporée au béton en substituant des taux de 0, 5, 10 et 15 % en masse de ciment. Les résultats montrent que l'ajout de la fumée de silice et des fibres métalliques améliore considérablement la résistance à la flexion des bétons.

I. 6. CIMENT PORTLAND AUX CALCAIRES

I. 6. 1. Les fillers calcaires

Les fillers sont des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches naturelles ou non, agissant sur certaines qualités du ciment (maniabilité, diminution de la perméabilité et de la capillarité, réduction de la fissurabilité...) grâce à leur granulométrie appropriée. Leur composition chimique est celle du carbonate de calcium (CaCO_3) mais ils peuvent contenir aussi du magnésium (Sous forme $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), s'il réagit du calcaire dolomitique. Les fillers les plus utilisés en France et en Algérie sont des fillers calcaires, selon la norme P 18 508, ils sont inertes, car ils n'ont aucune action sur le ciment en présence d'eau, ils jouent essentiellement un rôle de remplissage, permettant d'optimiser la compacité des bétons.

La norme EN 197-1 identifie deux types de ciment Portland-calcaire contenant 6-20 % de calcaire (type II/A - L) et 21-35 % de calcaire (type II/B - L), respectivement. Certains auteurs considèrent que la calcite a une certaine influence sur l'hydratation de C_3A et C_3S , le changement dans les C-S-H et la formation de zone de transition entre les fillers et la pâte de ciment démontre la réactivité des fillers calcaires [Heikal, M., et al. 2000], [Kakali, G., et al. 2000] et [Bonavetti, V., et al. 2001]. En conséquence, cette réactivité améliore la résistance au jeune âge, mais l'effet associé d'addition de calcaire est la réduction de la résistance postérieure par l'effet de dilution [Lawrence, P., 2000].

I. 6. 2. L'hydratation des ciments aux fillers calcaires

La présence de calcaire dans le mélange de ciments modifie le processus d'hydratation dès le début. Tout d'abord le calcaire fournit des zones de transition, qui peuvent augmenter le taux d'hydratation. Perra, J., Husson, S., et Guilhot, B. [Perra, J., et al. 1999] ont montré, par calorimétrie, que l'hydratation de silicate tricalcique C_3S est plus rapide en présence des fillers calcaires.

Les fillers calcaires augmentent également la réaction d'hydratation, mesurée par l'eau liée, et augmentent la teneur en CH [Kakali G., et al. 2000]. Ramachandran et Zhang [Ramachandran. V. et Zhang. C 1986], Soroka. I., et Stern. N. [Soroka et Stern, 1976] ont trouvé que l'ajout de 5 % de fillers calcaires entraîne une accélération de l'activité hydraulique précoce du clinker, le rapport E/C augmente, et plus d'eau est disponible pour la réaction d'hydratation.

Bonavetti, V., Rahhal, V., et Irassar, E. [Bonavetti, et al. 2003] ont signalé que l'ajout de fillers calcaires augmente le degré d'hydratation en tout temps et pour des rapports E/C différents. Bouasker, M., Mounanga, P., Turcruy, P., et Khelidj, A. L. A. [Bouasker, M. et al. 2008] ont étudié le degré d'hydratation de la pâte avec différents taux de fillers calcaires et différents rapports E/C, et ont également constaté que les fillers calcaires augmentent le degré d'hydratation lorsque 20 et 40 % de fillers calcaires sont incorporées par rapport à l'échantillon sans fillers calcaires.

La présence des fillers calcaires influe sur le temps de prise. Kenai, S., Soboyejo, W., et Soboyejo, A. [Kenai, S., et al. 2004] a trouvé que l'augmentation de la quantité des fillers calcaires jusqu'à 35 % entraîne une diminution du temps de début de prise de 40 minutes (le temps de début de prise pour les échantillons sans fillers calcaires était 3 heures et pour les échantillons avec 35 % de fillers calcaires était 2 heures et 20 minutes). D'autres auteurs ont suggéré que cela est dû à l'accélération de l'hydratation du C_3A par $CaCO_3$ pour former des carboaluminates, et à l'hydratation du C_3S pour former C-S-H et CH dans le ciment [Ramachandran et Zhang, 1986].

Il est maintenant bien connu que le filler calcaire est partiellement réactif dans les mélanges de ciment, il réagit avec le C_3A pour produire des phases de carboaluminates [Kakali, G., et al. 2000] [Matschei, T., et al. 2007]. La formation de phases de carboaluminate laisse plus de sulfate disponible pour former l'ettringite, c'est pourquoi on observe une augmentation de la quantité d'ettringite formée [Bonavetti, V., et al. 2001], [Kakali, G., et al. 2000], [Lothenbach, B., et al. 2008] et [Matschei, et al. 2007]. L'ettringite supplémentaire formée augmente le volume total des produits d'hydratation, ce qui peut contribuer à réduire la porosité et la perméabilité de la pâte de ciment. Bien que la réactivité du filler calcaire dans le système de ciment soit établie, la quantité du filler calcaire capable de réagir n'est toujours pas claire.

Matschei, T., Lothenbach, B., et Glasser, F. [Matschei, et al. 2007] affirment qu'à partir de la thermodynamique pour une composition typique de ciment portland, jusqu'à 5 % de la calcite réagit. Cependant, d'autres auteurs ont constaté que dans un ciment avec 5 % à 15 % de filler calcaire après 129 jours d'hydratation seulement 1 % à 1.5 % du carbonate de calcium est réagi, respectivement [Livesy, P. 1991]. On prétend que la réaction du filler calcaire avec C_3A permet de réguler les réactions précoces d'aluminate. Cependant, le filler calcaire a une solubilité plus faible que le gypse ainsi les ions de sulfate entrent plus rapidement dans la solution que les ions de carbonate. Par conséquent, le carbonate de calcium n'est pas aussi efficace que le gypse pour contrôler la prise.

I. 6. 3. Caractéristiques des ciments et des bétons aux fillers calcaires

Il est bien reconnu que le filler calcaire peut améliorer les propriétés physiques des matériaux cimentaires, comme la distribution granulométrique, la demande en eau et la maniabilité [Bonavetti V., et al. 2003], [El-Didamony, et El-Alfi, 1999 et 2000]. L'ajout de filler calcaire peut améliorer la distribution granulométrique en incorporant des grains de tailles différentes à ceux de clinker

Selon Schiller et Ellerbrock [Schiller. B. et Ellerbrock, H.G. 1992], la distribution granulométrique dépend de la méthode d'incorporation de filler calcaire (broyage avec clinker ou substitution de ciment), chaque méthode donne une granulométrie différente. La demande d'eau diminue lorsque la distribution granulométrique est plus large et elle augmente lorsque la distribution granulométrique est plus étroite. Toutefois, ils ont signalé que dans le ciment qui contient 10 % de filler calcaire, quelle que soit la répartition étroite ou large des particules, la demande en eau diminue. De plus, même lorsque le ciment à base de filler calcaire est moulu à une fraction plus fine pour obtenir la même résistance que le ciment pur. La demande en eau est inférieure à celle du ciment pur en raison de l'amélioration de la répartition granulométrique.

Kenai, S., Soboyejo, W., et Soboyejo, A. [Kenai, S., et al. 2004] ont montré que le filler calcaire, dont la distribution granulométrique est plus large que celle du clinker moulu et qu'il contient moins de particules de l'ordre de 5 à 20 μm , il remplit les vides entre les grains de clinker et il densifie la structure de la pâte de ciment durci.

Tezuka, Y., Gomes, D., Martins, D., et Djanikin, J. [Tezuka, Y., et al. 1992] ont montré que la maniabilité des mortiers avec 5 % de filler calcaire était améliorée et la demande en eau était diminuée par rapport au mortier de référence avec la même consistance. [Kenai, S., et al. 2004] a indiqué que l'incorporation de 5 à 20 % de filler calcaire augmente la demande en eau, et en est proportionnelle avec la teneur du filler calcaire en carbonate de calcium.

Soroka et Stern [Soroka et Stern 1976] ont trouvé que l'addition de filler calcaire dans le ciment influence la résistance des pâtes de ciment. Ils ont montré que le filler calcaire améliore significativement la résistance à la compression, ce qui est plus prononcé à des âges plus précoces. Ils ont trouvé des taux de filler calcaire qui peuvent être substitués sans effet négatif, 29 % jusqu'à 3 jours pourraient être substitués et 24 % et 13 % jusqu'à 7 et 28 jours, respectivement. Ils ont conclu que le filler calcaire affecte la résistance de compression principalement en raison de la vitesse croissante de l'hydratation du ciment, sur la base de la théorie de " l'effet de filler ".

L'ajout de filler calcaire augmente la densité du ciment et du mortier, et diminue la perméabilité [Soroka, et Stern, 1976], ce qui peut contribuer à l'amélioration de la résistance du mortier. La substitution de ciment jusqu'à 10 % par le filler calcaire ne réduit pas la résistance du béton [Livesy, P. 1991], [Schmidt, M. 1992] et [Soroka et Stern, 1976]. Aux plus hauts taux de substitution, la résistance est généralement diminuée. La perte de résistance peut être réduite par un broyage plus fin du ciment, car elle dépend de la finesse du ciment et du filler calcaire [Kenai, S., et al. 2004]. Jusqu'à certains taux de filler calcaire, inférieurs à 35 % un optimum de finesse de filler calcaire est nécessaire afin d'éviter la perte de résistance. Cependant, des taux au-dessus de 35 % de filler calcaire, diminuent la résistance indépendamment de la finesse. La résistance à la flexion diminue avec l'addition croissante de filler calcaire, mais le taux de réduction est relativement plus faible que pour la résistance à la compression.

Boubekeur T, Boulekbache, B, et Makhelouf. A., [Boubekeur. T., et al 2010] ont montré que la résistance à la compression des mortiers avec 10 % de filler calcaire est similaire à celle du mortier de contrôle à 2 jours, ensuite elle diminue. La résistance à la compression diminue proportionnellement avec l'augmentation du taux du filler calcaire dans les mortiers.

Boudchicha, A., Cheikh Zouaoui, M., Gallias, J.-L., et Mezghiche, B., [Boudchicha. A et al 2007] ont montré que l'incorporation des fillers calcaires dans les mortiers permettait d'améliorer les résistances à 07 jours jusqu'à 18 % à 10 % de substitution du ciment par l'addition, mais cette amélioration n'est pas maintenue à 28 jours et les résistances des mortiers avec des fillers calcaires sont plus faibles que celles du mortier de référence. Les chercheurs ont donc confirmé, que les résistances mécaniques des mortiers confectionnés avec des fillers calcaire sont faibles par rapport à celles du mortier sans fillers calcaire à plus longue échéance.

I. 7. CIMENT PORTLAND AUX POUDRES DE VERRE

I. 7. 1. Le verre

Le verre se définit comme « un solide non cristallin, présentant un phénomène de transition vitreuse ». Il est le plus souvent constitué d'oxyde de silicium (ou silice SiO_2 , constituant principal du sable) qui lui confère son caractère amorphe et de fondants, ainsi en fonction des propriétés finales et de l'usage désirés, on ajoute au verre soit du bore (verre borosilicate (B_2O_3) (pyrex)), du plomb (PbO) (verre de cristal), du sodium (Na_2O) et calcium (CaO) (sodocalcique). Parmi ces verres, les verres sodocalciques, utilisés pour la fabrication de bouteilles, de flacon et de vitrage, sont les plus répandus. Ils représentent en effet, plus de 90 % de la production de verre [Zachariassen 1932]. Les compositions typiques de verre creux, utilisées notamment pour la fabrication de bouteilles, sont présentées dans le tableau I. 7.

Tableau I. 6. Composition typique des verres creux [Shao et al. 2000], [Idir et al. 2010], [Idir 2009] et [Shayan et Xu. 2004 et 2006].

Elément	Min	Max	Typique
SiO_2	68.9	75	74
CaO	4.9	13	10.5
Al_2O_3	1.2	3.0	1.3
Fe_2O_3	0.1	0.9	0.4
MgO	0.3	1.1	0.5
SO_3	0.07	0.21	0.2
Na_2O	10	16	13
K_2O	0.2	0.7	0.2

I. 7. 2. Caractéristiques des ciments et des bétons avec de la poudre de verre

Certains travaux montrent une légère diminution de l'ouvrabilité avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la poudre de verre. Ce comportement est attribué à la géométrie des particules et à la réduction du module de finesse [Meyer et Baxter 1997] et [Yamada et Ishiyama 2005]. En revanche, d'autres auteurs ne notent qu'un effet négligeable sur la demande en eau ou en superplastifiant ; Xie, Z., Xiang, W. et Xi, Y. [Xie et al. 2003] et Jin, C., Meyer, C. et Baxter, S. [Jin et al., 2000].

La finesse de la poudre de verre a un impact sur le développement de la résistance à la compression. L'activité pouzzolanique augmente avec la finesse de la poudre de verre [Shao et al. 2000]. Idir, Cyr et Tagnit-Hamou [Idir et al. 2010] ont ainsi montré qu'un diamètre inférieur à 75 μm est favorable pour le développement des réactions pouzzolaniques.

Schwarz et Neithalath [Schwarz et al. 2008] ont montré qu'un remplacement de 10 % du ciment par la poudre de verre accélère l'hydratation du ciment au jeune âge, cet effet est attribué à la forte teneur en alcalins qui tendent à accélérer l'hydratation du ciment. La cinétique de la réaction du verre est rapide grâce à la concentration suffisante des alcalins dans la solution interstitielle est devenue suffisante, parce que le verre apporte lui-même les alcalins nécessaire au déclenchement de la réaction. Les travaux de Shi, Wu, Riefler, et Wang [Shi et al., 2005] et Shao, Y., Lefort, T., Moras, S. et Rodriguez, D. [Shao et al., 2000] viennent de confirmer cette tendance.

Batayneh, M., Marie, I., et Asi, I., [Batayneh et al., 2007] et Nishikawa, T., Takatsu, M. et Daimon, M. [Nishikawa et al., 1995] ont montré que la résistance augmenterait avec la teneur des mélanges

en poudre de verre. Cela pourrait s'expliquer notamment par les alcalins qui sont disponibles plus rapidement et en plus grand nombre dans la solution interstitielle.

Comme dans le cas des autres matériaux pouzzolaniques, la température joue un rôle important dans l'activation du verre. En effet, Shi, C., Wu, Y., Riefler, C. et Wang, H. [Shi et al., 2005] ont étudié l'effet de ce paramètre sur l'activité pouzzolanique du verre. Leurs résultats ont montré que l'activation du verre est très sensible à la température. En passant la cure de la température ambiante à 65°C, le gain de résistance en compression était de 80 % contre 20 %, la température de cure accélère l'activité pouzzolanique du verre.

Finalement, on conclut que du fait de sa nature amorphe et qu'il contienne des quantités relativement appréciables de silice, le verre pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland dans les bétons. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités et celles-ci ont encouragé plusieurs études Kateb Mohamed Lamine [Kateb. 2009], Ramlochan, T., Thomas, M. et Gruber, K. [Ramlochan et al., 2000], Topçu, İ. B. et Canbaz, M. [Topçu et Canbaz, 2004] et Park, S. B., Lee, B. C. et Kim J H. [Park. L et al. 2004].

I. 8. UTILISATION DU VERRE EN TANT QUE GRANULAT

I. 8. 1. Effet du granulats de verre sur les propriétés à l'état frais des bétons

Kateb Mohamed Lamine [Kateb. 2009] a montré que les taux de remplacement élevés des gros granulats par le verre influent plus sur l'affaissement des bétons que le remplacement des granulats fin. Il a observé une diminution de l'affaissement allant jusqu'à 30 %. Ramlochan, T., Thomas, M. et Gruber, K. [Ramlochan et al, 2000] ont observé une diminution importante de la maniabilité due au remplacement du granulats par du verre, ceci est dû à la quantité supplémentaire de pâte s'attachant au verre qui diminue la quantité de pâte disponible pour contribuer à la maniabilité du béton, l'angularité des particules de verre a également joué un rôle dans ce phénomène.

Topçu, İ. B. et Canbaz, M. [Topçu et Canbaz. 2004] ont observé une faible diminution de l'affaissement qui s'explique par la géométrie irrégulière et la surface lisse des particules de verre. De plus, la faible absorption du verre a permis d'augmenter la fluidité de mortier à la table vibrante. Cette faible absorption se traduit par une quantité supplémentaire d'eau dans la pâte, ce qui augmente la fluidité du béton.

I. 8. 2. Effet du granulats de verre sur les propriétés à l'état durci des bétons

Kateb Mohamed Lamine [Kateb. 2009] a observé que plus le taux de remplacement du granulats par du verre est élevé, plus la résistance à la compression a tendance à diminuer. Il a noté des résistances à la compression plus faible de 65 % comparé au béton témoin qui ne contient pas de verre. Cette diminution est importante à 100 % de remplacement des granulats par du verre, cela est dû à la mauvaise adhérence entre la pâte cimentaire et les granulats de verre.

Ramlochan, T., Thomas, M. et Gruber, K. [Ramlochan et al., 2000] ont mené des études sur des bétons en remplaçant des granulats fins par du verre et ils ont observé que la résistance en compression diminue proportionnellement avec l'augmentation de taux de remplacement de granulats par le verre. Cette augmentation se maintient dans le temps. Cependant la réduction de

la résistance est de 13.4 % par rapport au témoin pour leur mélange avec 70 % de remplacement granulaire. Ceci peut être expliqué par le manque d'adhérence entre les granulats et la pâte cimentaire.

Topçu, İ. B. et Canbaz, M. [Topçu et Canbaz. 2004] ont remarqué une diminution de la résistance à la compression allant jusqu'à 49 % pour un remplacement de 60 % des granulats. Selon ces auteurs, la grande fragilité des granulats de verre entraîne la fissuration et cause une mauvaise adhérence entre les granulats et la pâte de ciment. De plus, les auteurs n'ont pas obtenu une distribution homogène des granulats de verre à cause de la géométrie irrégulière des particules de verre.

Des auteurs ont étudié l'effet de l'utilisation des granulats de verre dans le béton sur la résistance à la traction. En effet, Park, S. B., Lee, B. C. et Kim J H. [Park. L et al. 2004] ont trouvé une réduction de la résistance à la traction de 15 % pour 70 % de remplacement de granulats par le verre. Topçu, İ. B. et Canbaz, M. [Topçu et Canbaz. 2004] ont trouvé une réduction de la résistance à la traction de 37 % pour 60 % de remplacement de granulat par le verre. Ils ont observé que la résistance à la traction diminue proportionnellement avec l'augmentation de taux de remplacement de granulat par le verre, et cela pourrait être dû à la faiblesse de la zone de transition [Ramlochan et al. 2000].

Ces auteurs ont montré aussi que l'incorporation des granulats de verre dans le béton influe sur la résistance à la flexion. À faible taux de remplacement (inférieur à 30 %), ils ont observé une légère diminution (3 %) de la résistance à la flexion alors qu'à taux de remplacement élevé (60-70 %), l'effet des granulats de verre est plus important.

Finalement, on conclut qu'incorporer le verre en tant que granulat a l'avantage d'utiliser de grands volumes de matière, et il ne nécessite pas de concassage fin, mais la principale préoccupation dans une telle application est le risque de la réaction alcali-silice [Pike et al., 1960], [Schmidt et al., 1963] et [Pattengil et Shutt 1973].

I. 9. LA REACTION ALCALI-SILICE

I. 9. 1. Définition de la réaction alcali- silice

La première observation rapportée du phénomène de réaction alcali-silice (RAS) concerne un barrage de Californie en 1940. Depuis, le fait a été constaté dans presque toutes les parties du monde. En France, le premier cas constaté date de 1976 et concerne également un barrage. Le phénomène est ensuite apparu dans d'autres ouvrages, essentiellement des ponts, ce qui a entraîné le démarrage de nombreux travaux de recherche visant à comprendre et combattre ce problème.

Typiquement la RAS conduit à l'amenuisement des capacités portantes des ouvrages ou à la réduction de leurs propriétés d'usage du fait de l'éclatement du béton, phénomène renforcé par les agressions exogènes favorisées par le défaut de protection ainsi initié.

Sur un béton les manifestations de la RAS visibles à l'œil ou mesurables, sont des faïençages à mailles plus ou moins larges ou en étoiles, des fissurations, des exsudations blanches de gels (à ne pas confondre avec les efflorescences de chaux carbonatée), des pustules ou cratères avec des

éclatements localisés en forme de petits cônes résultant de la réaction de gros granulats superficiels, des mouvements et déformations, un écaillage plus ou moins prononcé, la figure I. 1 illustre trois cas de dommages causés par la RAS.



Figure I. 1. Exemples de dommages occasionnés par la RAS [Larive, 97]

La RAS n'étant qu'une pathologie parmi d'autres qui peut provoquer ce type d'effets macroscopiques, un premier diagnostic demande à être confirmé par un examen du béton à très fine échelle, par exemple au microscope électronique à balayage (MEB). Il s'agit alors d'identifier les produits issus de la RAS et de visualiser les effets microstructuraux qui en résultent.

Le processus chimique reconnu comme l'explication de base de la RAS est : en présence d'eau, sous l'action des alcalins (potassium et sodium) délivrés par le ciment, par les granulats eux-mêmes ou par les adjuvants, la silice soluble présente dans les granulats forme un gel.

La réaction type de formation des gels pourrait être la suivante :

- dissolution de la silice $SiO_2 + OH^- = H_3SiO_4^-$
- dissolution de la portlandite de la pâte de ciment au fur et à mesure de la formation des ions OH^- pour respecter la valeur du produit de solubilité K_s
 - o $Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2OH^-$
 - o $(Ca^{2+})(OH^-) = K_s$
- la rencontre de la silice, des ions calciums et alcalins formerait un précipité, étant donné la grande variation de composition des gels rencontrés, il n'existe pas une réaction type, mais plusieurs.

I. 9. 2. Les granulats de verre et la réaction alcali- silice

Les premières études concernant l'incorporation de verre dans les bétons ; Pike, R.G., Hubbard, D. et Newman, E.S. [Pike et al., 1960], Schmidt, A. et Saia, W.H.F. [Schmidt et al., 1963] et Pattengil, M. et Shutt T.C. [Pattengil et Shutt 1973] impliquaient la réaction alcali-silice, car le verre contient une forte teneur en alcalins, susceptible d'engendrer des réactions avec les granulats.

Stanton T.E. [Stanton. 1940] est le premier à avoir indiqué que la taille des particules des granulats réactifs affecte l'expansion. Il semblerait que l'expansion augmente avec le diamètre des granulats réactifs. En effet, dans le cas du verre, diverses études ont montré que diminuer la finesse du verre entraînait la RAS. Nous pouvons citer les travaux de Shao, Y., Lefort, T., Moras, S. et Rodriguez, D. [Shao et al., 2000], Shi, C., Wu, Y. , Riefler, C. et Wang, H. [Shi et al., 2005]

et Shayan et Xu [Shayan, A. et Xu, A. 2002 et 2006]. Pour certains auteurs 150 μm est la limite pour laquelle les bétons ne risquent pas d'être atteints de la RAS. Meyer, C. et Baxter, S. [Meyer et Baxter, 1997] ont lancé un programme expérimental sur l'étude de l'effet de la taille des granulats de verre sur les gonflements des bétons. Ainsi, différentes classes granulaires de verre de 35 μm à 12 mm ont été étudiées. Ces auteurs concluent que l'expansion était proportionnelle à la taille des grains de verre.

Les travaux de Jin, C., Meyer, C. et Baxter, S. [Jin et al., 2000] ont été menés sur les variations des expansions des bétons en fonction de la teneur en verre, ils ont montré que plus il y avait de verre dans les mélanges, plus l'expansion est importante, donc pas de pessimum.

Cependant, pour certains auteurs, il existerait une taille de granulat pour laquelle l'expansion produite est maximale, cette taille est appelée " pessimum ". Nous pouvons citer les travaux de Xie, Z., Xiang, W. et Xi, Y. [Xie et al, 2003] qui ont mis en évidence l'effet pessimum sur des familles de granulats de taille comprise entre 0.150 et 4.75 mm. D'après ces auteurs ce pessimum se situerait entre 1.18 et 2.36 mm. Quant à Yamada, K. et Ishiyama, S. [Yamada et Ishiyama 2005] ce pessimum serait de 0.6 mm ou même de 0.25 mm.

I. 9. 3. Effet des additions minérales sur la réaction alcali-silice

Dans la décennie qui a suivi les travaux de Stanton [Stanton. 1940], plusieurs auteurs ont proposé l'utilisation des additions minérales (le laitier granulé, la pouzzolane naturelle, la fumée de silice, les fillers calcaires et la poudre de verre) pour supprimer ou réduire les effets néfastes causés par la réaction alcali-silice.

I. 9. 3. 1. Effet du laitier granulé sur la réaction alcali-silice

Le laitier granulé pourrait être très efficace dans le contrôle de la RAS car il réduit le taux et la mobilité des alcalins dans le béton. Hester, D., McNally, C., et Richardson, M. [Hester et al. 2005] ont procédé à une évaluation comparative de deux taux d'alcalin (5 et 6 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$) sur la potentialité de la RAS du béton. Des essais d'expansion ont été effectués sur des mélanges de béton avec du ciment Portland (CP), deux types de laitier avec teneur en alcalins différents (< 1 et > 1 %) et trois types de granulats.

Ils ont montré que le remplacement partiel du ciment Portland par du laitier réduisait considérablement l'expansion du béton. Les bétons de laitier présentaient de très faibles vitesses d'expansion, et qu'il n'y avait pas de différence significative dans le comportement quel que soit le type de granulat ou le taux d'alcalin, ce qui indique que le taux d'alcalin du laitier n'est pas un facteur contributif à 50 % de remplacement du ciment par du laitier.

Hogan, F.J., Meusel, J.W. [Hogan et Meusel. 1981] ont montré que le remplacement partiel du ciment à taux élevé en alcalin par du laitier réduit considérablement la probabilité de la RAS dans le béton. Mehta. P.K. [Mehta. 1986] a mentionné que même si le taux d'alcalin du laitier est élevé, sa solubilité dans l'environnement à PH élevé du béton peut être faible, de sorte que même un taux élevé en alcalin d'un ciment binaire peut ne pas causer de problèmes.

Kwon [Kwon. 2005] a étudié l'effet du laitier granulé sur la RAS d'un béton à haute performance dosé à 450 kg/m^3 de ciment, il a utilisé trois finesses de laitier 4 000, 6 000 et 8 000 cm^2/g et quatre taux de substitution de ciment : 0, 30, 45 et 60 %. Il a observé que les valeurs d'expansion

étaient de 0.20, 0.105, 0.06 et 0.02 % pour le taux de substitution du laitier de 60, 45, 30 et 0 %, respectivement, ce qui montre que le laitier a un effet inhibiteur sur la RAS, et que la finesse du laitier avait un effet significatif. L'effet du laitier était plus important pour le taux de substitution de 30 % et une finesse de 8 000 cm²/g, suivi de 6 000 et 4 000 cm²/g dans cet ordre.

Bouikni, A., Swamy, R.N., Bali, A. [Bouikni et al. 2009] ont étudié la réaction alcali-silice du béton avec 50 et 65 % de laitier, où un ciment Portland à haute teneur en alcalin (1 % d'oxyde de sodium) et un laitier à 0.53 % d'oxyde de sodium ont été utilisés.

Ils ont montré que l'exposition continue à un régime chaud et humide a entraîné une expansion croissante, le béton contenant 65 % de laitier présentait toujours moins d'expansion que le béton incorporant 50 % de laitier aux âges correspondants. En retirant les éprouvettes de la chambre chaude pour les amener dans une ambiance sèche, les éprouvettes ont montré une réduction de l'expansion. L'exposition alternative à l'environnement chaud et humide a accéléré l'expansion.

1. 9. 3. 2. Effet de la pouzzolane naturelle sur la réaction alcali-silice

La pouzzolane naturelle contrôle la RAS par la diminution de la concentration des alcalins dans la solution interstitielle, l'adsorption d'eau et la réaction pouzzolanique. Daskiran, E.G. et Daskiran, M.M [Daskiran et Daskiran. 2015] ont étudié l'efficacité de deux pouzzolanes naturelles à différentes teneurs en silice réactive à contrer l'expansion due à la RAS dans des mortiers, à l'aide de la méthode accélérée (ASTM C1260). Les taux de substitutions massiques de ciment par les pouzzolanes naturelles sont 10 % et 20 %. Trois granulats réactifs S1, S2 et S3 sont utilisés pour préparer les éprouvettes de mortier (25 x 25 x 225 mm). Ils ont conclu que le remplacement de 20 % de ciment par des pouzzolanes naturelles est efficace pour atténuer les expansions dues à la RAS.

Foroughi, M., Tabatabaei, R., et Shamsadeini, M., [Foroughi et al. 2012] ont étudié le potentiel de la réaction alcali-silice des mélanges de mortier avec quatre pouzzolanes naturelles provenant de différentes régions de la ville de Kerman situées dans le sud-est de l'Iran. Les pouzzolanes naturelles sont ajoutées aux mélanges en remplacement de 5, 10, 20, 35 et 50 % en masse de ciment. La méthode ASTM C 1260 a été utilisée pour prédire l'expansion des éprouvettes de mortier, après immersion dans une solution alcaline pendant 14 jours.

Ils ont montré que la pouzzolane naturelle a un effet positif sur la réduction des expansions dues à la RAS. Le remplacement de 5 % du ciment par la pouzzolane naturelle qui contient plus de 5 % d'oxyde de calcium a entraîné une augmentation des expansions. Les spécifications pour l'utilisation de la pouzzolane comme alternative d'atténuation de la RAS devraient tenir compte que, à mesure de l'augmentation de la teneur en calcium de la pouzzolane, les quantités de pouzzolane utilisées dans le béton doivent également être augmentées.

Ghassan. K., Al-Chaar, Mouin Alkadi et Panagiotis G. Asteris [Ghassan et al 2013] ont étudié l'effet de la substitution de ciment par deux types de pouzzolanes naturelles de différentes régions : Jordanie et Arabie saoudite sur l'expansion due à la RAS des mortiers, les taux de substitution sont 10, 20, 30 et 40 %. L'étude a été effectuée selon la norme ASTM C1260-07, à 14 jours l'expansion supérieure à 0.20 % indique que le granulats est potentiellement réactif, tandis qu'une expansion inférieure à 0.10 % indique que le granulats est non réactif. Les résultats de l'essai

d'expansion montrent que les deux pouzzolanes naturelles réduisent considérablement les expansions des mortiers et contrôlent la RAS.

1. 9. 3. 3. Effet de la fumée de silice sur la réaction alcali-silice

Il est généralement admis que 5 % de la fumée de silice ne suffisent pas à contrôler l'expansion, les taux requis publiés variant entre 7.5 % et 15 %. Il a également été constaté que la fumée de silice retarde le début de l'expansion, mais elle peut entraîner une expansion plus importante à des âges supérieurs à deux ans. Dans certains cas le béton de fumée de silice a commencé à s'expanser après plus de quatre ans à un rythme similaire à celui du témoin à un âge plus précoce [Oberholster, 1989]. Hobbs [Hobbs, 1988] a attribué l'efficacité de la réduction rapide de l'expansion due à la RAS par la fumée de silice, à sa réaction rapide avec les alcalins lorsque le béton est encore à l'état plastique. Une telle réactivité élevée est attribuée à la finesse extrêmement élevée et à l'important taux en silice amorphe de la fumée de silice. Après le durcissement, la teneur en alcalin du béton devient inférieure au niveau requis pour provoquer une réaction délétère avec le granulat.

Perry, C. et Gillott, J. E. [Perry et Gillott, 1985] ont étudié l'expansion des mortiers contenant 4 % d'opale (granulat à réaction rapide) par rapport au granulat total, avec différents taux de fumée de silice, et un ciment Portland de 0.70 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, le taux d'alcalin des mortiers a été porté à 1 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ en masse de ciment en ajoutant le NaOH. Ils ont remarqué que, à six mois, 10 % de la fumée de silice ont maintenu l'expansion inférieure à la limite suggérée par la norme ASTM C 227 (0.10 %). Cependant, les mortiers contenant 10 % et 15 % de fumée de silice ont commencé à s'expanser plus rapidement après un an. Leur expansion dépassaient 0.10 % après 600 jours. Il est intéressant de noter que la fumée de silice a retardé l'expansion des mortiers contenant de l'opale. Cela souligne l'efficacité de la fumée de silice à réduire l'expansion aux âges jeunes, ce qui est attribué en partie à sa réactivité pouzzolanique rapide et en autre partie à sa capacité à améliorer la structure des pores et à réduire la mobilité des ions.

De nombreux chercheurs ont signalé le retard du début de l'expansion dans les mortiers ou des bétons contenant de la fumée de silice. Oberholster [Oberholster. 1989] a constaté que l'expansion des éprouvettes de béton contenant de la fumée de silice et un granulat réactif, exposées aux conditions du terrain devait commencer après plus de quatre ans. Les expansions des éprouvettes, contenant 450 kg/m^3 de ciment Portland, 5.04 kg/m^3 de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ et 7 % de fumée de silice, étaient respectivement de 0.01 % et 0.09 % après cinq et sept ans. C'est-à-dire que l'expansion a commencé à un âge avancé, mais à un rythme relativement rapide. L'expansion limite 0.05 % a été atteinte au bout de 6 ans, c'est-à-dire seulement un an après le début de l'expansion.

Alasali. M.M. [Alasali. 1989] a étudié l'expansion du béton contenant de la silice amorphe fondue (15 % en masse de granulat), du ciment fortement alcalin (1.0 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) et un dosage de ciment de 300 kg/m^3 . Une fumée de silice condensée ($\text{SiO}_2 = 98.5 \%$ et $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} < 0.31 \%$) a été utilisée à des taux de substitution de 10 % et 30 %. Différents taux d'alcalin ont été étudiés 1.0, 3.0 et 6.0 kg/m^3 de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ par addition de NaOH. Il a constaté que, après 278 jours, 10 % de fumée de silice n'ont pas réduit l'expansion par rapport à celle du témoin aux mêmes taux d'alcalin. Tandis que, l'expansion était complètement supprimée à 30 % de fumée de silice, quel que soit le taux d'alcalin du béton.

Dunster, A.M., Kawano, H., et Nixon, P.J. [Dunster et al. 1990] ont étudié l'expansion des bétons maintenus à 20 °C et à 100 % HR. Différents taux d'alcalin ont été étudiés 2.5, 3.0, 3.5 et 4.0 kg/m³ de Na₂Oeq en mélangeant deux ciments Portland à 1.0 % et 0.7 % de Na₂Oeq et en ajoutant du sulfate de potassium en cas de besoin, le dosage en ciment est 350 kg/m³. Le granulats réactif utilisé était du silice calciné. Trois rapports de (granulats réactif/granulats total) ont été utilisés : 5 %, 10 % et 15 %. La fumée de silice utilisée a une surface spécifique $\geq 20\ 000$ m²/kg, une teneur en SiO₂ ≥ 85 % et Na₂Oeq ≤ 2.0 %, elle a été utilisée à des taux de substitution de 5 %, 10 % et 15 % en masse de ciment. Ils ont constaté que, après un an de l'essai, 10 % de fumée de silice a réduit l'expansion de 0.65 % (cas du béton témoin) jusqu'à 0.2 %. Cependant, la valeur d'expansion 0.2 % est beaucoup plus élevée à la limite suggérée pour l'expansion non délétère (0.04 %).

Fournier, B., Bilodeau, A. et Malhotra, V.M. [Fournier et al. 1995] ont examiné l'efficacité de la fumée de silice à contrôler l'expansion du béton fabriqué avec un granulats réactif. Des prismes de béton ont coulé avec du ciment dosé à 420 kg/m³ et un taux d'alcalin de 1.25 % Na₂Oeq en masse de ciment (par ajout de NaOH au mélange). Une fumée de silice a un taux élevé en silice et faible en alcalin, a été utilisée à une substitution de 7.5 %, 10 % et 12.5 %. Les éprouvettes ont été maintenues à 38 °C et à 100 % HR. Le suivi de l'expansion durant deux ans a montré que tous les bétons avec de fumée de silice avaient des valeurs d'expansion significativement inférieures à celles du béton témoin (0.09 % et 0.28 % pour 7.5 % de béton avec fumée de silice et le béton témoin, respectivement). Cependant, 10 % de fumée de silice n'étaient pas suffisants pour maintenir l'expansion inférieure à la limite de 0.04 % .

Duchesne J., et Bérubé M.A., [Duchesne et Bérubé, 1994] ont trouvé que l'efficacité de la fumée de silice dépend de sa composition chimique. Utilisant des prismes de béton dosé à 350 kg/m³ de ciment et 1.25 % de Na₂Oeq, ils ont comparé les performances de deux fumées de silice à contrôler l'expansion du béton contenant deux types de granulats réactifs, un Tuf Rhyolitique et un calcaire siliceux (Spratt).

Ils ont conclu que l'efficacité de la fumée de silice dépend de sa teneur en silice et en alcalin, plus que le taux de la silice est élevé et le taux en alcalin est bas, plus que l'efficacité de la fumée de silice à atténuer l'expansion due à la RAS est élevée. Ils ont également recommandé de prévoir une période d'essai plus longue (plus de deux ans) pour le béton contenant de la fumée de silice.

Grattan-Bellew [Grattan-Bellew, 1991] a constaté que l'expansion des prismes en béton contenant des granulats réactifs (Spratt) et la fumée de silice dépassait la limite de 0.04 % après deux ans, bien que l'expansion de l'échantillon, qui contenait 11 % de fumée de silice condensée, ne dépasse pas 0.01 % après une année. Cela montre que 11 % de fumée de silice pourraient ne pas être efficace pour atténuer l'expansion du béton contenant le granulats Spratt et du ciment à haute teneur en alcalin. Il souligne également l'expansion tardive du béton de fumée de silice.

Boddy, A.M., Hooton, R.D., Thomas, M.D.A. [Boddy et al., 2003] ont étudié l'efficacité de deux fumées de silice à teneur en silice différente : LS (68 % SiO₂) et FS (88 % SiO₂) sur l'expansion due à la RAS. Les fumées de silice sont incorporées dans les mortiers par la substitution de 0, 4, 8 et 12 % en masse de ciment. Ils ont montré que, les mortiers contenant 12 % de fumée de silice

LS n'ont pas réussi à contrôler l'expansion due à la RAS et la fumée de silice FS était la plus efficace.

1. 9. 3. 4. Effet des fillers calcaires sur la réaction alcali-silice

Zubair. M [Zubair. M., 2018] a étudié l'effet des fillers calcaires sur la RAS, il a préparé cinq mélanges avec substitution progressive (0, 20, 30, 40, 50 et 60 %) du ciment par les fillers calcaires. Il a comparé l'effet des fillers calcaires sur l'expansion due à la RAS avec autres additions minérales, comme le laitier granulé et la cendre volante. Théoriquement, les mélanges contenant les fillers calcaires inertes ne devraient pas réduire l'expansion due à la RAS que par l'effet de dilution. Il a conclu que l'utilisation des fillers calcaires en substitution progressive du ciment a entraîné une réduction progressive de l'expansion, jusqu'au taux de 50 %, mais il est moins efficace que le laitier granulé et la cendre volante.

Chun-Tao Chen, Wei-Cheng Yang et Wen-Lin Chou [Chun-Tao Chen et al. 2013] ont étudié des éprouvettes de mortier (25x25x285 mm) avec des taux de substitution progressives des volumes de ciment (0, 5, 10, 15, 20 et 25 %) par les fillers calcaires, le granulats utilisés est le verre Pyrex qui contient du silicate réactif, deux rapports E/C : 0.47 et 0.6 ont été adoptés.

Les résultats de tests réalisés selon la norme ASTM C1260 montrent que l'expansion a augmenté progressivement avec le temps et, l'incorporation des fillers calcaires a effectivement réduit l'expansion due à la RAS pour les deux rapports E/C. Toutefois, les fillers calcaires n'avaient pas un grand effet sur l'expansion au cours de la première semaine, probablement parce que le processus d'hydratation était encore faible. En général, l'effet inhibiteur des fillers calcaires sur l'expansion due à la RAS des mortiers était plus important au rapport E/C = 0.6 qu'au rapport E/C = 0.47.

Ils ont suggéré un taux optimal de 10 % des fillers calcaires, car il a effectivement réduit l'expansion des mortiers aux deux rapports E/C. Avec l'incorporation de 15 % de filler calcaire ou plus, la réduction de l'expansion à 14 jours n'était pas très éloignée de celle de 10 %. Compte tenu des autres effets indésirables de l'ajout de calcaire, tels que la réduction de la résistance à des doses plus élevées. L'ajout de 10 % de filler calcaire semble être le plus approprié.

Ils ont conclu que comme l'expansion due à la RAS a été attribuée aux réactions entre le verre actif et les alcalins des ciments, la substitution de ciment par les fillers calcaires, réduit la quantité des alcalins dans les mélanges. De plus, les fillers calcaires peuvent remplir les microspores et ils dispersaient les particules de ciment et agissent comme une barrière contre l'eau, ce qui retarde l'hydratation du ciment et la libération des alcalins, car une microstructure dense résiste davantage à l'expansion due à la RAS.

1. 9. 3. 5. Effet de la poudre de verre sur la réaction alcali-silice

Plusieurs études ont montré la réduction des expansions dues à la RAS par l'incorporation de la poudre de verre dans les mélanges cimentaires. Moisson [Moisson. M. 2005], Kaveh A. et Prasada R.R. [Kaveh et Prasada 2015] ont utilisé la poudre de verre comme remplacement de granulats réactifs, quant à Shuaicheng G., Qingli D., Xiao S., Xianghui X., Ruizhe S., et Jiaqing W., [Shuaicheng et al. 2018], Guojun K, Wengui L, Ruyi L, Yuelin L et George W [Guojun et al.

2018] et Dumas M. É. [Dumas. M. 2019], ils ont utilisé la poudre de verre comme remplacement d'une partie de ciment en présence du granulat réactif.

Moisson [Moisson. M. 2005] a étudié l'expansion des mortiers renfermant le verre comme granulat réactif, auquel sont substituées des poudres de verre (0-80 μm) à raison de 0, 10 et 20 % en masse. Le ciment utilisé est un ciment Portland CEM 52.5, à teneur en alcalins égale à 0.8 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$. Il a mesuré les expansions d'éprouvettes de mortier 4x4x16 cm selon l'essai accéléré par autoclave conformément à la norme NF P 18-590. Les surfaces spécifiques des poudres de verre ont été amenées, par broyage, aux valeurs de 100, 200 et 400 m^2/Kg . Il a mesuré aussi, la variation relative de longueur pour les prismes de béton 7x7x28 cm renfermant 20 % de poudre de verre en substitution massique de granulat. Les prismes de béton ont été conservés dans un réacteur conformément à la norme NF P 18-454.

Il a observé que la poudre de verre réduit l'expansion des mortiers, et le taux de réduction varie dans le même sens que le taux de substitution de granulat par la poudre de verre ainsi que dans le même sens que la finesse. La réduction de l'expansion des bétons observée est très forte puisqu'elle abaisse les expansions sous la barre de $200 \cdot 10^{-6}$ à 5 mois et amènent à classer le béton comme non réactif.

Kaveh A. et Prasada R.R. [Kaveh et Prasada 2015] ont étudié l'efficacité de la poudre de verre à contrer la RAS dans des mortiers et des bétons, en remplacement partiel massique des taux de 10, 20 et 30 % de granulat réactif. Ils ont étudié deux poudres de verre à granulométrie différente qui sont 17 et 70 μm et deux granulats réactifs : un granulat de verre recyclé produit à partir de bouteilles de soda de différentes couleurs et un granulat naturel de type argilite. Des essais accélérés sur des mortiers et des bétons ont été réalisés en utilisant un ciment Portland de type I à teneur élevée en alcalin ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0.88 \%$).

Ils ont constaté que la granulométrie de la poudre de verre est un paramètre important pour caractériser sa réactivité pouzzolanique. La poudre de verre avec une granulométrie plus petite a présenté un meilleur comportement pouzzolanique. Le remplacement partiel de granulat réactif par la poudre de verre s'est révélé très prometteur pour atténuer l'expansion due à la réaction alcali-silice. Les taux efficaces de remplacement des masses du granulat réactif par la poudre de verre sont 20 et 30 % pour le granulat de verre et le granulat de type argilite, respectivement.

Shuaicheng G., Qingli D., Xiao S., Xianghui X., Ruizhe S., et Jiaqing W., [Shuaicheng et al. 2018] ont étudié l'effet de la poudre de verre à réduire les dommages de la RAS. L'essai accéléré d'expansion a été effectué sur des mortiers (2.54 x 2.54 x 28.575) cm^3 contenant des granulats de verre réactif selon la norme ASTM C1260. Trois types de poudre de verre ont le même taux d'alcalin et des finesses différentes, ainsi qu'une cendre volante classe F, ont été utilisées.

Ils ont montré que les additions minérales peuvent réduire considérablement l'expansion due à la RAS, et que la poudre de verre peut réduire efficacement les dommages dus à la RAS avec un taux de remplacement suffisant et une finesse importante.

Guojun K, Wengui L, Ruyi L, Yuelin L et George W [Guojun et al. 2018] ont étudié les effets de différents taux et finesse de la poudre de verre sur l'expansion due à la réaction alcali-silice des mortiers. Un ciment Portland ordinaire a été utilisé avait une densité de $3.06 \text{ g}/\text{cm}^3$ et une surface

spécifique de $296 \text{ m}^2/\text{kg}$, conformément à la norme ASTM C150. Le granulat réactif utilisé est un mélange de quartz et de chert. La poudre de verre a été fabriquée par broyage des bouteilles de verre blanc par un broyeur à boulets pendant 35 minutes. Ensuite, les particules ont été tamisées en six fractions par une tamiseuse comprenant des plages de taille de $38\text{--}53 \mu\text{m}$, $53\text{--}75 \mu\text{m}$, $75\text{--}150 \mu\text{m}$, $150\text{--}300 \mu\text{m}$, $300\text{--}600 \mu\text{m}$ et $600\text{--}900 \mu\text{m}$. Une cendre volante (FA) de classe F (densité : $2.24 \text{ g}/\text{cm}^3$, surface spécifique : $376 \text{ m}^2/\text{kg}$), a été utilisée.

Les éprouvettes de mortier ont été préparées conformément à la norme ASTM C1260. Le ciment Portland a été partiellement remplacé par de la poudre de verre à des pourcentages de 10, 20 et 30 % en poids, et six finesses de poudre de verre ont été adoptées pour chaque taux de remplacement. Des échantillons avec substitution de cendres volantes aux trois taux de remplacement ont également été réalisés à des fins de comparaison. Les essais ont été réalisés selon ASTM C1567, la dimension des mortiers était de $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 285 \text{ mm}$. L'expansion a été mesurée à des intervalles réguliers pendant 3, 7, 14, 28 et 35 jours.

Ils ont montré que l'expansion due à la RAS de tous les mortiers augmente à mesure que la taille des particules augmente à différents âges de durcissement. La poudre de verre plus fine diminue l'expansion due à la RAS des mortiers et présente un effet d'atténuation plus favorable sur l'expansion.

Ils ont constaté que les expansions dues à la RAS des mortiers diminuent avec l'augmentation du taux de la poudre de verre et elles sont inférieures à l'expansion des mortiers de contrôle à différents âges de durcissement. Le taux plus élevé en poudre de verre avec une taille de particules inférieures à $300 \mu\text{m}$ produit une expansion plus faible des mortiers et a un effet d'atténuation plus favorable sur l'expansion. Au contraire, l'expansion des mortiers contenant de la poudre de verre avec des fractions de granulométrie de $300\text{--}600$ et $600\text{--}900 \mu\text{m}$ (granulométrie supérieure à $300 \mu\text{m}$) augmente avec l'augmentation du taux de la poudre de verre, et elles sont toutes supérieures à l'expansion des mortiers témoins à différents âges de durcissement. Cela indique que le taux plus élevé de la poudre de verre avec une granulométrie supérieure à $300 \mu\text{m}$, conduit à une expansion plus élevée des mortiers, sans aucun effet d'atténuation de l'expansion due à la RAS. Les poudres de verre avec une granulométrie inférieure à $300 \mu\text{m}$ présentent un excellent effet d'atténuation de l'expansion. Avec un taux plus grand et une granulométrie plus petite, l'effet d'atténuation de l'expansion augmente progressivement. L'effet d'atténuation des poudres de verre avec une granulométrie allant de 38 à $53 \mu\text{m}$ et un taux de remplacement de 20 % en masse de ciment semble relativement meilleur que celui des cendres volantes.

Dumas M. É. [Dumas. M. É. 2019] a vérifié l'efficacité de la poudre de verre à contrôler l'expansion due à la RAS dans des mortiers et des bétons contenant des granulats de verre. Deux types de poudre de verre ont été étudiés, une poudre de verre sodocalcique obtenue par broyage des bouteilles de différentes couleurs et une poudre de verre de source électronique provenant des résidus de l'industrie de l'électronique (télévision, ordinateur, téléphone portable ...), ainsi que deux autres ajouts cimentaires que sont la cendre volante et le métakaolin ont été utilisés. Quatre types de ciment ont été utilisés soit un ciment du type GU (ciment à usage général), GU pale, GU à faible teneur en alcalis et un ciment blanc.

Une grande série de mortiers et des bétons contenant des granulats de verre a été réalisée afin de déterminer les combinaisons de matériaux cimentaires les plus efficaces. Les ajouts cimentaires sont incorporés dans les mélanges en substitution de 10, 20 et 30 % de ciment par un seul ajout (combinaisons binaires) ou deux types d'ajout (combinaisons ternaires).

Il a montré que les mortiers de référence 100 % de ciment présentent des expansions qui dépassent la limite d'expansion permise de 0.15 % à 14 jours selon la norme CSA A23.2 27A. Les mélanges avec ajout cimentaire développent des expansions nettement inférieures à cette limite. Les mélanges ternaires incorporant de la poudre de verre ayant les faibles. Cela montre que lorsque la poudre de verre est combinée avec d'autres ajouts cimentaires, elle peut contrôler l'expansion due à la RAS.

I. 9.4. Mécanismes d'action des additions minérales sur la RAS

Différents auteurs ont cherché à comprendre les mécanismes expliquant la réduction des expansions dues à la RAS. Nous décrivons dans cette section les principales hypothèses qui ont été avancées jusqu'à aujourd'hui.

I. 9.4.1. Diffusivité ionique et perméabilité de la pâte de ciment

L'emploi des additions minérales entraîne la formation de C-S-H par la réaction pouzzolanique. Ces C-S-H remplissent les pores de la pâte de ciment durcie et mènent à une diminution de sa porosité, donc à une baisse de la perméabilité. En conséquence, il y aurait une réduction de la mobilité ionique gênant la migration des alcalins vers les granulats réactifs ; Uchikawa [Uchikawa 1986], Turriziani [Turriziani 1986], Glasser [Glasser 1992], Bérubé et Duchesne [Bérubé et Duchesne 1992], Xu et Hooton [Xu et Hooton 1993], Duchesne et Bérubé [Duchesne et Bérubé 1994], Qian C., Guo H. et Tang M. [Qian et al. 1994], Xu G.J.Z., Watt D.F., Hudec P.P [Xu et al. 1995] et Monteriro P.J.M., Wang K., Sposito G., dos Santos M.C., de Andrade W.P., [Monteriro et al. 1997].

I. 9.4.2. Résistance mécanique du béton

La réaction pouzzolanique entre la silice des additions et la portlandite, permet d'améliorer les résistances mécaniques et d'augmenter la rigidité de la pâte de ciment. Ceci aurait également pour effet de limiter les déformations de la pâte Turriziani [Turriziani 1986], Bérubé et Duchesne [Bérubé et Duchesne 1992], Duchesne et Bérubé [Duchesne et Bérubé 1994] et Xu G.J.Z., Watt D.F., Hudec P.P [Xu et al. 1995].

I. 9.4.3. Dilution des alcalins

Les mélanges avec additions permettraient alors de maintenir un rapport eau/ciment plus élevé que les mélanges correspondants sans additions, Entraînant ainsi une dilution des alcalins.

Toutefois, le mécanisme de dilution des alcalins n'explique pas certains résultats expérimentaux :

- l'effet bénéfique des additions a été également observé pour des mélanges ayant des teneurs constantes en alcalins [Oberholster 1989].
- certaines additions (comme la poudre de verre) contiennent des concentrations en alcalins, bien supérieures à celles des ciments, contribuant malgré cela à réduire les expansions de façon significative [Hudec P.H., et Ghamari C., 2000].

1. 9. 4. 4. Consommation de la Portlandite

Chatterji [Chatterji 1979], Chatterji S., Taulow N., Christensen, P. et Jensen, A.D., [Chatterji et al., 1983], Bleszynski et Thomas [Bleszynski et Thomas, 1998] considèrent que la consommation de la portlandite par les additions minérales joue un rôle majeur dans le contrôle de l'expansion des bétons atteints de la RAS. Deux approches ont été proposées :

- baisse du pH : les additions minérales diminuent la quantité de Ca(OH)_2 dans la pâte de ciment, ce qui entraînerait ainsi une réduction de son pH à un niveau sécuritaire vis-à-vis de l'attaque des granulats réactifs en limitant la solubilité de la silice.
- gels néfastes ou gels inoffensifs : selon Chatterji S., Taulow N., Christensen, P. et Jensen, A.D., [Chatterji et al., 1983], la présence de Ca(OH)_2 serait nécessaire au développement de RAS "destructive", c'est-à-dire à la production de gels gonflants. Le rôle des additions consommant la portlandite ne serait pas d'empêcher le développement de la RAS, mais plutôt de rendre les gels inoffensifs et rendre ainsi la RAS "non destructive".

1. 9. 4. 5. Piégeage des alcalins

De nombreux travaux ont porté sur les mécanismes selon lesquels les C-S-H issus de la réaction pouzzolanique permettraient d'adsorber ou d'incorporer dans leur structure une quantité importante d'alcalins, réduisant ainsi la concentration d'ions alcalins en solution et entraînant une baisse globale du pH de la solution interstitielle.

Au fil des ans, plusieurs auteurs ont rallié cette hypothèse, Chatterji S., Taulow N., Christensen, P. et Jensen, A.D., [Chatterji et al., 1983], Qian C., Guo H. et Tang M. [Qian et al. 1994] supposent en effet que pour des structures en contact avec des sources externes et inépuisables d'alcalins, la consommation de ces derniers par les C-S-H pouzzolanique serait insuffisante pour assurer une protection contre le développement de la RAS. Or, il s'est avéré, notamment lors d'essais de laboratoire, que la protection assurée par les additions pouzzolaniques est efficace et effective, malgré la présence d'alcalins en quantités importantes. C'est le cas de l'essai ASTM C 1260 (mortier plongé dans une solution 1M NaOH à 80 °C), qui, malgré l'abondance des alcalins, n'empêche pas les additions de réduire les expansions des mortiers. Le piégeage des alcalins ne serait donc pas le mécanisme majeur et ne suffirait pas à expliquer seul le rôle des additions.

Qian C., Guo H. et Tang M. [Qian et al. 1994] supposent que les additions elles-mêmes adsorbent les alcalins (et non pas les C-S-H produits par la réaction pouzzolanique) :

- plus l'addition est acide, plus elle adsorbe des alcalins,
- l'adsorption dépend de la concentration en OH^- : plus ils sont présents dans la solution, plus il y a d'adsorption.

Le modèle physique proposé est que les additions retardent la migration d'ions dans la solution interstitielle, moins d'ions atteignant les granulats réactifs. Les auteurs considèrent qu'il s'agit d'une sorte d'action chimique activée par les ions OH^- . Ainsi, dans les matrices basiques (sans additions), les ions alcalins peuvent atteindre le granulats et s'adsorber à sa surface. Au contraire, dans les matrices acides (avec des additions), la matrice attire les ions alcalins et les ions OH^- .

I. 10. CONCLUSION

Cette étude bibliographique a montré que par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des bétons à l'état frais et durci. Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes.

L'incorporation des granulats de verre dans les bétons est bien possible, la taille des grains influe sur ses propriétés à l'état frais et durci, et la principale préoccupation dans une telle application est le risque de la réaction alcali-silice (RAS), car le verre contient une forte teneur en alcalins. La taille des granulats de verre influe aussi sur la RAS, il semblerait que l'expansion due à la RAS augmente avec le diamètre des granulats de verre.

La réaction alcali silice est une réaction chimique se produisant dans le béton, lorsque trois conditions sont réunies : présence de granulat potentiellement réactif, humidité relative supérieure à 85 % et concentration en alcalin au-dessus d'un seuil critique.

Les manifestations de la RAS visibles à l'œil ou mesurables, sont des faïençages à mailles plus ou moins larges ou en étoiles, des fissurations, des exsudations blanches de gels, des pustules, des mouvements et déformations, un écaillage plus ou moins prononcé.

La réaction alcali-silice, n'était qu'une pathologie parmi d'autres qui peut être maîtrisée par la substitution partielle de ciment par les additions minérales. Les mécanismes d'action des additions minérales sur la réaction alcali-silice puissent être à l'origine de la réaction pouzzolanique.

En général, les additions minérales sont utilisées pour former des C-S-H capables de fixer des alcalins et de réduire la perméabilité du béton, ce qui gênera le libre mouvement des ions alcalins et réduira la réaction potentielle entre les alcalins et les granulats. Nous nous proposons donc :

- de concevoir des mélanges avec d'importants taux de remplacement du ciment par des additions minérales, ces mélanges doivent avoir des bonnes caractéristiques rhéologiques et mécaniques.
- de valoriser une catégorie de matériaux naturels ou sous-produits industriels disponibles en Algérie. De ce fait, les additions minérales choisies pour l'étude sont courantes et de faible coût. Il s'agit de laitier granulé des hauts fourneaux, pouzzolane naturelle et fillers calcaires. Pour analyser, les différents effets des additions minérales sur les mélanges cimentaires, nous avons utilisé deux autres additions qui sont la fumée de silice et la poudre de verre.
- de vérifier si l'utilisation de ces additions minérales comme méthode de prévention contre les expansions due à la réaction alcali-silice peut être généralisée.

CHAPITRE II
MATERIAUX ET METHODES
EXPERIMENTAUX

CHAPITRE II

Matériaux et Méthodes Expérimentaux

II.1	INTRODUCTION	34
II.2	METHODOLOGIE EXPERIMENTALE	34
II.3	CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES	35
II.3.1	Ciment	35
II.3.2	Additions Minérales.....	36
II.3.3	Granulats	37
II.3.3.1	Sable normalisé (SN).....	37
II.3.3.2	Granulats concassés (GC).....	37
II.3.3.3	Granulats de verre recyclé (GVR)	38
II.3.4	Adjuvant	38
II.3.1	Eau de gâchage.....	38
II.4	METHODES EXPERIMENTALES	38
II.4.1	Caractéristiques des granulats	38
II.4.1.1	Masse volumique	38
II.4.1.2	Analyse granulométrique.....	38
II.4.1.3	Equivalent de sable	39
II.4.1.4	Absorption d'eau	39
II.4.1.5	Résistance à l'abrasion (Los – Angeles).....	40
II.4.2	Essais sur des pâtes de liant.....	40
II.4.2.1	Consistance normalisée	40
II.4.2.2	Temps de prise.....	40
II.4.3	Essais sur mortier.....	40
II.4.3.1	Compacité du mortier frais	40
II.4.3.2	Maniabilité du mortier frais	41
II.4.3.3	Essai accéléré par autoclave.....	42
II.4.3.4	Résistances mécaniques.....	43
II.4.4	Essais sur les bétons	43
II.4.4.1	Essais Ultrasoniques	43
II.4.4.2	Réactivité de béton vis-à-vis de l'alcali réaction.....	44
II.4.4.3	Mesure de la fissuration des éprouvettes.....	44
II.4.4.4	Résistances mécaniques des bétons.....	45
II.5	CONCLUSION	46

Chapitre II

Matériaux et Méthodes Expérimentaux

II. 1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressées dans un premier temps à la méthodologie expérimentale adoptée, puis à la caractérisation des différents matériaux qui seront utilisés dans cette étude. Les différentes propriétés physico-chimiques et minéralogiques seront présentées. Par la suite, on présentera les différentes méthodes expérimentales menées sur les pâtes, les mortiers et les bétons à l'état frais et à l'état durci.

L'étude expérimentale a été réalisée au niveau du laboratoire de Matériaux et Structure du Génie Civil à l'Université Badji Mokhtar Annaba, du laboratoire de la cimenterie de Hadjar-soud à Skikda, ainsi que au niveau du Laboratoire Travaux Public de l'Est.

II. 2. METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

Dans le but de maîtriser les effets que peuvent engendrer les additions minérales sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci, nous proposons d'utiliser une méthodologie spécifique qui est basée sur trois conditions essentielles :

- Introduire les additions minérales dans le mélange en substitution volumique progressive de 10 % à 50 % du ciment.
- Maintenir la consistance du mélange frais constante.
- Maintenir la quantité d'eau constante.

La première condition vise à garantir le maintien du volume absolu des constituants solides de la matrice cimentaire dans les différents mélanges. En effet, dans la majorité des études publiées, l'introduction des additions minérales dans le mélange est effectuée en substitution massique du ciment. Dans ce cas, si la masse volumique de l'addition est plus faible que celle du ciment, ce qui est généralement le cas, le volume absolu du liant (ciment + addition) croît proportionnellement au taux de substitution du ciment par l'addition. Si de plus, le rapport massique eau/liant reste constant, le rapport volumique eau/liant diminue et consécutivement la porosité du mélange frais. Par conséquent, les modifications dans la matrice cimentaire sont d'autant plus importantes que le taux de substitution du ciment par l'addition minérale augmente et que l'écart entre la masse volumique absolue du ciment et celle de l'addition minérale est significatif. Ces modifications volumiques peuvent influencer sur les résistances mécaniques et ne peuvent être évitées que lorsque les additions minérales sont introduites en substitution volumique du ciment.

La deuxième condition vise à garantir une lubrification équivalente des grains solides du squelette granulaire pour toutes les formulations avec ou sans additions minérales, permettant la mise en place et le serrage des mortiers et bétons dans les moules de manière similaire.

La troisième condition vise à garantir le maintien de la compacité du squelette granulaire à l'état frais. Dans ces conditions, la porosité initiale et le volume de la matrice cimentaire des mortiers

restent constants indépendamment du caractère et de l'intensité de l'effet granulaire des additions minérales. Il paraît donc intéressant de pouvoir déterminer, en premier lieu, l'action physique des additions minérales sur les mélanges cimentaires afin de comprendre les conditions dans lesquelles leur incorporation dans le mortier et/ou le béton peut apporter des améliorations significatives de la compacité du squelette granulaire. Quant à l'effet physico-chimique des additions minérales, il sera déterminé indirectement à partir de la modification des résistances mécaniques des mortiers et bétons. L'effet inhibiteur de la réaction alcali silice par les additions minérales sera déterminé, en étudiant la variation dimensionnelle, pondérale et la variation des performances mécaniques des mortiers et bétons affectés par cette réaction.

En première phase, l'ouvrabilité des mélanges est conservée constante par la correction de la quantité d'eau dans le mélange sans l'utilisation d'un adjuvant fluidifiant. Cette partie de l'étude permettra d'évaluer d'abord l'effet granulaire des additions minérales sur le besoin en eau, la densité des mélanges à propriétés rhéologiques constantes permettant ainsi une lubrification équivalente des grains solides du squelette granulaire qui assure la mise en place et le serrage des mélanges dans les moules de manière similaire. L'effet physico-chimique des additions minérales sera évalué indirectement à partir de la variation des résistances mécaniques.

En deuxième phase, la quantité d'eau dans les mélanges cimentaires sera maintenue constante pour toutes les formulations afin de permettre le maintien de la compacité du squelette granulaire à l'état frais. Dans ce cas, l'ouvrabilité des mélanges est conservée par l'introduction d'un adjuvant superplastifiant pour maintenir l'effet granulaire des additions minérales, et seul l'effet physico-chimique des particules de l'addition minérale dans la phase cimentaire est pris en compte.

Finalement, comme la synthèse bibliographique vient de le montrer ; plusieurs chercheurs ont pensé à utiliser des additions minérales pour réduire les expansions parasites provoqués par des granulats réactifs lorsqu'ils sont introduits dans des bétons. La variabilité des conditions expérimentales d'un auteur à l'autre, la spécificité des matériaux employés, empêchent de tirer des généralités quant à l'efficacité de l'emploi d'additions minérales comme modérateurs de l'expansion de la réaction alcali-silice. Cette étude consistait à montrer, comme une règle générale, que les additions minérales, quelle que soit leur nature minéralogique dès lors qu'ils contiennent de la silice soluble, peuvent limiter ou neutraliser l'expansion due à la RAS.

II. 3. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

II. 3. 1. Ciment

Afin que cette étude couvre de la meilleure manière l'utilisation des additions minérales dans les matériaux cimentaires, nous avons utilisé un seul type de ciment pour la totalité de nos essais ; nous avons sélectionné un ciment CPA-CEM I 42.5 (Norme NF 197-1 et NA 422), commercialisé par la cimenterie Lafarge à Hammam Dalaâ-M'sila. Les caractéristiques physiques, la composition chimique et la composition minéralogique de ce ciment sont données dans le tableau II. 1.

Tableau II. 1. Caractéristiques physiques, composition chimique et minéralogique du ciment

Caractéristiques physiques								
Masse volumique (Kg/m ³)						Surface spécifique (Blaine) cm ² /g		
Apparente			Absolue					
1050			3050			3020		
Composition chimique (%)								
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P.F
63.80	20.61	4.95	5.85	1.33	0.59	0.09	1.94	0.84
Composition minéralogique (Bogue)								
Phases	C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF	
Pourcentage(%)	53.58		22.23		8.05		12.24	

II. 3. 2. Additions Minérales

Les additions minérales ont été préparées au laboratoire de département de Génie civil, un broyeur à boules d'une capacité de 10 kg a servi au broyage, le nombre des boules (10 boules) ainsi que le temps du broyage (8 heures) ont été maintenus constants tout au long de la procédure de broyage, la quantité des additions minérales retenue est celle passant par le tamis 80 µm. Les additions minérales utilisées sont le laitier granulé (La), la pouzzolane naturelle (Pz), la fumée de silice (Fs), le filler calcaire (Fc) et la poudre de verre (Pv), ils ont des natures minéralogiques, morphologiques et chimiques différentes.

Ses principales caractéristiques physiques, compositions chimiques et minéralogiques sont récapitulées dans le tableau II. 2 et le tableau II. 3.

Tableau II. 2. Caractéristiques physiques des additions minérales

Additions minérales	Désignation	Masse volumique absolue (Kg/m ³)
Laitier granulé de hauts fourneaux	La	2800
Pouzzolane naturelle	Pz	2650
Fumée de silice	Fs	1870
Filler calcaire	Fc	2700
Poudre de verre	Pv	2750

Tableau II. 3. Compositions chimiques des additions minérales

Additions minérales	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P.F
Laitier granulé	43.01	40.08	5.2	0.53	6.4	-	-	-	-
Pouzzolane naturelle	10.10	44.85	17.20	10.50	3.4	1.60	4.05	1.50	4.10
Fumée de silice	20	79	-	-	-	-	-	-	1
Filler calcaire	55.5	-	-	0.03	0.8	-	-	-	43.6
Poudre de verre	7.21	66.73	0.68	0.11	4.05	0.19	13.37	0.19	0.65

II.3.2.1. Laitier granulé

Le laitier granulé (La) est un sous-produit de l'élaboration de la fonte, déversé dans des fosses à sa sortie du haut fourneau, et se présente sous forme de granulats de 0 à 20 mm après concassage. Le laitier granulé provient du complexe métallurgique d'El Hadjar, wilaya d'Annaba, il a une couleur grise et une forme minéralogique stable et un pouvoir hydraulique modeste.

II.3.2.2. Pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle (Pz) est obtenue par broyage d'une roche naturelle d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamdi situé à 2500 km au sud de Beni-saf à l'Ouest de l'Algérie.

II.3.2.3. Fumée de silice

La fumée de silice (Fs) est commercialisée par la société Granitex Algérie comme addition pour la confection des bétons spéciaux. Elle est issue des fours à arc électrique de l'industrie du ferro silicium. Ses particules sont des sphéroïdes submicroniques de silice amorphe condensés en agglomérats de quelques micromètres.

II.3.2.4. Filler calcaire

Le filler calcaire (Fc) est obtenue par broyage d'une roche naturelle de calcite cristallisée à plus de 99 %, elle est de même nature minéralogique que le granulats concassés provient d'un gisement de calcaire situé à Héliopolis wilaya de Guelma à l'est de l'Algérie.

II.3.2.5. Poudre de verre

La poudre de verre (Pv) est obtenue par broyage de déchet de verre des vitres, qu'il provient de la SARL Vitre Khezzane dont l'usine est située à la zone industrielle Meboudja, Chaiba, Sidi Amar à Annaba, la forme des particules est arrondie, à faciès sans arêtes.

II.3.3. Granulats

Pour le besoin de l'étude, nous avons jugé important d'utiliser trois types de granulats, le premier est un sable roulé provient d'Oued Boubkar de la région de Bouthelja, El tarf, siliceux et fin, utilisé pour l'élaboration d'un sable normalisé (SN). Le deuxième est un granulats concassés (GC), de nature calcaire provient de la carrière Héliopolis wilaya de Guelma à l'est de l'Algérie. Le troisième est un granulats de verre recyclé (GVR).

II.3.3.1. Sable normalisé (SN)

À défaut de manque de sable normalisé en quantité importante, nous avons élaboré un sable normalisé au laboratoire, par tamisage et criblage d'un sable roulé siliceux pour obtenir une composition granulométrique conforme à la composition granulométrique spécifiée du sable normalisé NF EN 196 - 1. La teneur en eau de l'échantillon représentatif de sable déterminée par sa perte de masse après séchage à une température comprise entre 105 et 110 °C, elle doit être inférieure à 0.2 %. Le tamisage doit être poursuivi jusqu'à ce que la quantité de sable passant à travers chaque tamis soit inférieure à 0.5 g/min. Ce sable normalisé obtenu doit être stocké dans des sacs en plastique de poids net égal à (1350 ± 5) g, ce sable sera utilisé pour étudier l'effet des additions minérales sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers.

II.3.3.2. Granulats concassés (GC)

La valorisation des sables de concassage dans l'emploi des bétons constitue une action d'intérêt général et de portée nationale. Actuellement en Algérie, les sables de concassage, par leur méconnaissance, sont moins recherchés par rapport aux sables d'oued ou de mer : absence de normes ou de règles qui définissent leurs caractéristiques ainsi que leur limite d'emploi.

Ces types de sables contiennent souvent une quantité exagérée de fines dont la forme de grains est irrégulière, généralement de forme anguleuse. La fragmentation des roches notamment des calcaires s'accompagne de la production d'éléments très fins. La nature et la dureté de la roche influent sur la forme des grains pour un même mode de concassage.

Les sables et graviers concassés (SC) et (GC) utilisés sont de granulométrie continue de classes (0.16/5), (5/8) et (8/15). Les fines inférieures à 160 μm ont été éliminées pour éviter toute

interaction avec les particules des additions minérales, ce granulats sera utilisé pour étudier l'effet des additions minérales sur les propriétés physico-mécaniques des bétons d'une part, il sert comme granulats inerte pour confectionner les éléments témoins vis-à-vis de la réaction alcali-silice (RAS), d'autre part.

II.3.3.3. Granulats de verre recyclé (GVR)

Le granulats recyclé est issu du broyage de verre de vitres, il a été fourni sous forme de débris de dimension d'environ 50 mm, partiellement débarrassé de ses impuretés. Le verre livré a été lavé à l'eau puis mis en étuve à 80 °C pour le sécher. Après refroidissement, le matériau sec a été introduit dans un broyeur à boulets d'une capacité de 10 kg et broyé durant 8 heures, puis par tamisage et pesage, on obtient les différentes classes granulaires (0.16/5) qui correspond à un sable (SVR) et (5/8), (8/15) qui correspond à un gravier (GVR). Les fines inférieures à 160 µm ont été éliminées pour éviter toute interaction avec les particules des additions minérales. Comme des multiples études antérieures ont montré que le granulats de verre recyclé était potentiellement réactif, nous avons le pris comme un granulats réactif, dans notre étude, pour la vérification de l'effet inhibiteur des additions minérales sur la RAS.

II.3.4. Adjuvant

L'adjuvant employé est un superplastifiant haut réducteur d'eau (MEDAPLAST SP 40), noté (SP), produit par Granitex Algérie, conforme à la norme NF EN 934 – 2. La plage de dosage recommandée est 0.6 à 2.5 % du poids du ciment. Ses principales caractéristiques sont récapitulées dans le tableau II. 4.

Tableau II. 4. Caractéristiques du superplastifiant utilisé

Caractéristiques	Forme	Couleur	Densité	pH	Teneur Cl	Extrait sec
MEDAPLAST SP 40	Liquide	Marron	120±0.01	8.2	< 1 g/l	40 %

II.3.5. Eau de gâchage

L'eau utilisée lors de la fabrication des mélanges de mortier et béton est l'eau déminéralisée, elle ne doit pas présenter une grande quantité d'impuretés qui peuvent dégrader les propriétés des mélanges (NF EN 1008).

II.4. METHODES EXPERIMENTALES

II.4.1. Caractéristiques des granulats

II.4.1.1. Masse volumique

Les masses volumiques apparentes et absolues des différents granulats étudiés naturels ou recyclés sont mesurées d'après la norme NF EN 1097 - 3, les résultats sont résumés dans le tableau II. 5. Nous remarquons que la masse volumique des granulats recyclés est plus faible que celle, des granulats naturels.

II.4.1.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée conformément à la norme NF P 18 - 560 et NF EN 933 - 1, elle permet de déterminer la grosseur et les pourcentages de grains constituant l'échantillon. Nous l'appliquons sur le granulats de calcaire concassé (GC), la quantité de sable retenue pour cette analyse ne doit pas contenir des fines inférieure à 80 µm. Pour le granulats de verre recyclé (GVR), nous avons élaboré un sable et un gravier qui ont la même granulométrie que le sable et

le gravier de calcaire concassé (GCC). Le sable normalisé (SN) a été élaboré par tamisage et criblage pour obtenir une composition granulométrique conforme à celle du sable normalisé EN 196 - 1. Les courbes granulométriques des graviers et sables utilisés sont présentés par la figure II. 1. Nous remarquons d'après ces courbes granulométriques que malgré l'élimination des fines le sable (SGC) contient beaucoup des grains fins, la granulométrie de granulat (GC) est continue, sable (0/5) et gravier (5/15). Les différents granulats utilisés sont acceptables pour la confection du béton hydraulique.

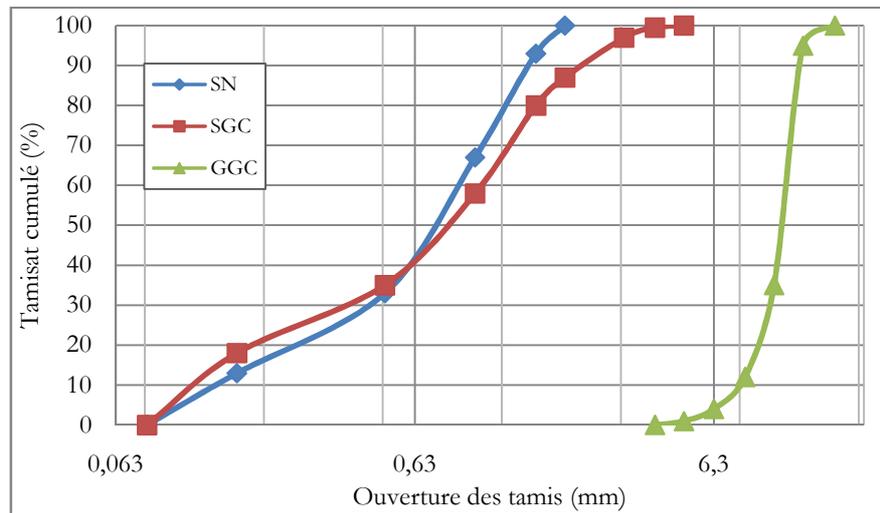


Figure II. 1. Courbes granulométriques des granulats

II.4.1.3. Equivalent de sable

Le but de cet essai est de mettre en évidence la propreté du sable. L'essai a été fait conformément à la norme NF EN 933 – 8. Il consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution de flocculant, après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H_1 et du sédiment + flocculant H_2).

L'équivalent de sable est donné par la relation suivante : $E_S = \left(\frac{H_1}{H_2}\right) \cdot 100$ (II. 1)

L'équivalent de sable permet de quantifier la notion de propreté d'un sable, la présence d'un excès d'argile peut provoquer une augmentation du retrait et une forte demande en eau, ce qui entraîne une baisse de résistance mécanique. Cependant un manque total de fines conduit à des bétons peu maniabiles, ségrégations et de faible compacité. L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible. Nous remarquons une augmentation de l'équivalent de sable pour les granulats de verre recyclés et le sable naturel par rapport à celui des granulats concassés. Les résultats de l'essai d'équivalent de sable sont présentés dans le tableau II. 5.

II.4.1.4. Absorption d'eau

On détermine un coefficient d'absorption d'eau qu'est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion pendant 24 heures à 22° C à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme NF EN 1097 - 6. Nous remarquons que les sables recyclés absorbent l'eau beaucoup plus que les sables naturels. Les résultats de l'essai d'absorption d'eau sont présentés au tableau II. 5.

II.4.1.5. Résistance à l'abrasion (Los - Angeles)

La dureté des granulats utilisés a été contrôlée par l'essai de Los-Angeles conformément à la norme NF EN 1097 - 2 qui exige la valeur-limite minimale de 40 %. Cet essai consiste à mesurer la résistance des granulats à la fragmentation par chocs et à l'usure par choc. Le coefficient Los Angeles est calculé par la formule suivante : $L_A = \frac{P \times 100}{5000}$ (II. 2)

Les granulats sont qualifiés comme suite :

- LA < 15Très bon.
- $15 \leq LA \leq 20$ Bon à moyen.
- $20 \leq LA \leq 30$ Moyen à faible.
- LA ≥ 30 Médiocre.

Ce coefficient est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon. Les coefficients Los Angeles des granulats utilisés sont 21 % et 26 % pour le gravier concassé (GC) et le gravier de verre recyclé (GVR), respectivement (tab II. 5). Les granulats sont considérés comme bons à moyens pour un usage dans les bétons hydrauliques.

Tableau II. 5. Caractéristique des granulats

Caractéristiques	Unité	Sable roulé	Granulat concassé		Granulat de verre recyclé	
			Sable	Gravier	Sable	Gravier
Masse volumique apparente	kg /m ³	1360	1425	1370	1325	1250
Masse volumique absolue	kg /m ³	2550	2500	2500	2600	2600
d/D	-	0/4	0/4	5/15	0/4	5/12
Module de finesse	-	1.65	3.75	-	-	-
Équivalent de sable	%	85	80	-	85	-
Coefficient d'absorption	%	-	-	1.4	3.5	2.4
Coefficient Los Angeles	%	-	-	21	-	26

II.4.2. Essais sur des pâtes de liant

II.4.2.1. Consistance normalisée

La consistance normale est déterminée selon la norme NF EN 196 - 3 qui consiste à déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une pâte de ciment dite normale.

II.4.2.2. Temps de prise

L'essai de prise est normalement effectué sur une pâte de liant normale, conformément à la norme NF EN 196 - 3.

II.4.3. Essais sur mortier

II.4.3.1. Compacité du mortier frais

La compacité du squelette granulaire des mortiers à l'état frais a été déterminée pour vérifier directement la densité de l'empilement granulaire. Elle a été calculée par une méthode utilisée par plusieurs auteurs Boudchicha, A., Cheikh Zouaoui, M., Gallias, J.-L., et Mezghiche, B., [Boudchicha et al. 2007] , elle est basé sur les masses volumiques apparentes des mortiers à l'état frais, en tenant compte des masses volumiques absolues des constituants solides, et est exprimée en pourcentage (%).

La masse volumique du mortier à l'état frais a été mesurée pour chaque formulation en remplissant manuellement un récipient de volume et de masse connus, juste après le malaxage. Le remplissage du récipient est effectué suivant le même mode de serrage que pour les éprouvettes.

La compacité du mélange frais a été déterminée en (%) sur la base de la relation suivante :

$$\text{Compacité} = 100.(c + s + f) \dots\dots\dots(\text{II. 3})$$

c, s et f, désignent respectivement les volumes absolus de ciment, de sable et d'addition minérale dans le mélange, en (m³).

$$\left. \begin{aligned} c &= \frac{C}{\rho_c} \\ s &= \frac{S}{\rho_s} \\ f &= \frac{F}{\rho_F} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(\text{II. 4})$$

C, S, et F désignent respectivement les dosages de ciment, de sable, et d'addition dans le mélange, en (kg/m³).

Q_C, Q_S, et Q_F désignent respectivement les masses volumiques absolues de ciment, de sable et d'addition, en (kg/m³).

Q_E, désigne la masse volumique absolue de l'eau, considérée égale à 1000 kg/m³.

$$\left. \begin{aligned} C &= MVA \frac{M_C}{M_C+M_S+M_F+M_E} \\ S &= MVA \frac{M_S}{M_C+M_S+M_F+M_E} \\ F &= MVA \frac{M_F}{M_C+M_S+M_F+M_E} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(\text{II. 5})$$

MVA, désigne la masse volumique apparente du mortier frais après sa mise en place dans les moules, en (kg/m³).

M_C, M_S, M_F et M_E désignent respectivement les masses de ciment, de sable, d'addition et d'eau utilisées lors du gâchage, en (kg).

II.4.3.2. Maniabilité du mortier frais

La consistance de référence a été évaluée en mesurant l'étalement du mortier à l'état frais sur une table à secousses (figure II. 2. a), selon la norme EN 1015 - 3 (1999). Le mortier frais étant placé dans un cône de diamètre inférieur : 100 mm, diamètre supérieur : 70 mm et de hauteur : 60 mm (figure II. 2. c). Après enlèvement du cône, la table subit 30 secousses en 30 secondes et la valeur de l'étalement considéré, constitue la moyenne de la mesure de l'étalement du mélange sur deux directions perpendiculaires (figure II. 2. b).

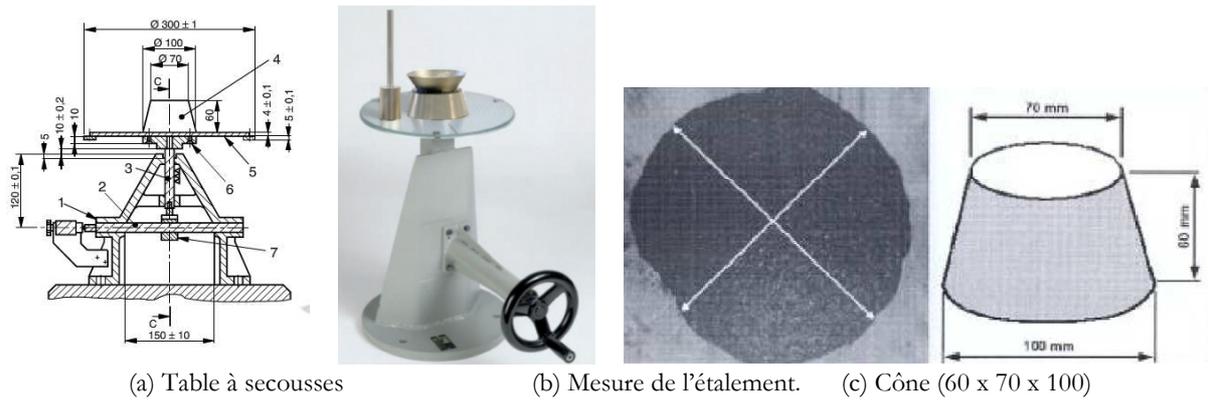


Figure II. 2. Mesure de l'étalement des mortiers à l'état frais

II.4.3.3. Essai accéléré par autoclave

L'essai accéléré par autoclave XP P 18 - 594 (2004) permet de déterminer la réactivité potentielle des granulats en présence d'ions alcalins on mesurant les variations dimensionnelles d'éprouvettes de mortier 4x4x16 cm (Fig II. 3), enrichi en alcalin (4 % du ciment, en masse), autoclavées pendant 5 h à la température de 127 °C et à la pression relative de 0.15 MPa (Fig II. 4).



Figure II. 3. Dispositif avec comparateur pour la mesure de la longueur des éprouvettes



Figure II. 4. Autoclave (XP P 18-594).

Le sable doit avoir une granularité de 0.16 - 5 mm par échantillonnage ou s'il a lieu par concassage. Après lavage et séchage à 80 °C, le sable est séparé en cinq fractions et recomposé pour obtenir la répartition granulaire suivante :

Tableau II. 6. Pourcentage des différentes classes granulaires constituant le sable

Classes granulaires	Pourcentage en masse
0.16 - 0.315	10
0.315 - 0.63	10
0.63 - 1.25	25
1.25 - 2.5	25
2.5 - 5	30

Le variation dimensionnelle de chaque éprouvette ϵ_i ($i = 1, 2, 3$) est calculé en prenant comme la longueur de base : $L_0 = 160$ mm, selon l'équation :

$$\varepsilon_i = \frac{L_{1i} - L_{0i}}{L_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots (II. 6)$$

La variation pondérale m_i ($i = 1, 2, 3$) est calculé en mesurant la masse M_0 des éprouvettes lorsque on les retire de l'eau et la masse finale M_i ($i = 1, 2, 3$) après la fin de l'autoclavage, selon l'équation :

$$m_i = \frac{M_{1i} - M_{0i}}{M_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots (II. 7)$$

II.4.3.4. Résistances mécaniques

Pour chaque mortier ayant acquis la consistance de référence, on a préparé des éprouvettes 40 mm x 40 mm x 160 mm. Les résistances à la traction par flexion 3 points (Fig II. 5) et les résistances en compression des mortiers (Fig II. 6) ont été évaluées :

- à 7 et 28 jours, afin de déterminer l'effet pouzzolanique des additions minérales sur les caractéristiques mécaniques des matériaux.
- et après l'essai accéléré par autoclave, afin de quantifier leur effet sur la perte de résistances due à la RAS.

La norme EN 196 - 1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. La presse électromécanique utilisée est de type Zwick/Roe II Z020, dont le pilotage et l'acquisition des résultats sont assurés par ordinateur à partir du logiciel testXpert II.



Figure II. 5. Essai de traction par flexion sur mortier



Figure II. 6. Essai de compression sur mortier

II.4.4. Essais sur les bétons

II.4.4.1. Essais Ultrasoniques

Nous proposons d'étudier le comportement des ondes ultrasonores selon la norme NF EN 12504 - 4, afin de mieux définir la dégradation causée par la RAS.

La vitesse d'impulsion est donnée par la formule :

$$V = \frac{L}{T} \quad \dots\dots\dots (II. 8)$$

où :

V : vitesse de propagation du son, en km/s.

L : longueur de parcours, en mm.

T : temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur, en μ s.

II.4.4.2. Réactivité de béton vis-à-vis de l'alcali réaction

Cet essai mesure la réactivité de la formule de béton testée vis-à-vis de l'alcali-réaction, selon la norme NF P 18 - 454 et le fascicule FD P 18 - 456, par un essai de gonflement de trois prismes de béton de dimensions (7 x 7 x 28 cm) conservés dans un réacteur où règne une ambiance saturée en humidité à une température de $60\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$.

Les échéances des mesures sont 0-4-8-10-12 semaines puis toutes les 4 semaines.

À chaque échéance (t) et pour chaque prisme (n), calculer :

- La déformation longitudinale moyenne des trois prismes en % avec quatre chiffres après la virgule.
- La variation de masse de chaque prisme en %, avec deux chiffres après la virgule.

II.4.4.3. Mesure de la fissuration des éprouvettes

Nous avons photographié les éprouvettes de béton (puis nous avons utilisé un logiciel de dessin pour développer une cartographie des fissures sur les six faces de chaque éprouvette). Ensuite, les mesures de la largeur et la densité des fissures ont été relevées à l'aide d'une lunette micrométrique (Figure II. 7) pour la détection des fissures ayant un grossissement de 24 x et réticule 4 mm/0.02, les mesures ont été évaluées sur 15 points pour chaque éprouvette de béton afin d'obtenir des valeurs moyennes pertinentes.



Figure II. 7. Lunette micrométrique pour mesure de largeur de fissure

Le Fissurotest est un appareil qui permet de mesurer l'ouverture d'une fissure en millimètre. Sous la forme d'un microscope portable, l'optique interne est équipée d'une règle rotative que l'on positionne perpendiculairement à la fissure. Plus précise que le Fissurotest, la lunette micrométrique permet de mesurer l'ouverture d'une fissure avec une résolution d'un centième de millimètre. Elle peut être équipée d'un éclairage interne afin de faciliter la lecture.

II.4.4.4. Résistances mécaniques des bétons

- *La résistance en traction par flexion*

La résistance en traction par flexion 3 points a été déterminée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (7 x 7 x 28) cm³ à l'aide d'une presse hydraulique d'une capacité maximale de 150 KN, conformément à la norme NF EN 12390 - 5 (figure II. 8).

La résistance à la traction par flexion est calculée selon la formule suivante :

$$R_{tf} = \frac{3.P.L}{2.b.h^2} \text{ (MPa)(II. 9)}$$

Avec :

P : l'effort de rupture en N.

L : la distance ente les appuis en mm.

b, h : dimension d'éprouvette en mm.

- *La résistance en compression*

La résistance en compression a été déterminée sur des éprouvettes de forme cubique de dimensions (7 x 7 x 7) cm³ conformément à la norme NF EN 12390 - 3. L'écrasement des éprouvettes a été réalisé à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN avec une vitesse de chargement de 2.4 ± 0.2 kN/Sec, (Fig II. 9).

La résistance en compression R_{cj} est calculée selon la formule suivante :

$$R_{cj} = \frac{P}{S} \text{ (MPa) (II. 10)}$$

Avec :

P : la charge de rupture en (N),

S : est la section transversale de l'éprouvette en (mm²)



Figure II. 8. Essai de traction par flexion sur les bétons



Figure II. 9. Essai de compression sur les bétons

II.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons expliqué la méthodologie expérimentale adoptée pour la formulation des mortiers et des bétons, nous avons identifié les constituants utilisés dans notre étude, les matériaux sont caractérisés selon des modes opératoires et recommandations normalisés spécifiques, leur différentes propriétés physico-chimiques et minéralogiques sont présentées et discuté. Nous avons présenté les différents essais expérimentaux sur les pâtes, les mortiers et les bétons.

Le troisième chapitre sera consacré à la détermination de l'effet des additions minérales sur les propriétés rhéologiques des pâtes et mortiers à l'état frais, dans une première partie. Ainsi, la deuxième partie du chapitre sera consacrée à l'étude de l'effet des additions minérales sur les propriétés mécaniques des mortiers à l'état durci.

CHAPITRE III
EFFET DES ADDITIONS
SUR LES MORTIERS

CHAPITRE III

Effet des Additions sur les Mortiers

III.1	INTRODUCTION	49
III.2	EFFET DES ADDITIONS SUR LES PATES DE LIANT	49
III.2.1	Effet des additions minérales sur la consistance normale	49
III.2.2	Effet des additions minérales sur la prise du ciment.....	50
III.3	FORMULATION DES MORTIERS SANS ADJUVANTS (SSP)	52
III.4	EFFET DES ADDITIONS SUR LES MORTIERS SANS ADJUVANTS	53
III.4.1	Effet des additions sur les mortiers frais sans adjuvant (SSP).....	53
III.4.1.1	La compacité des mortiers frais sans adjuvant (SSP).....	53
III.4.1.2	La maniabilité des mortiers frais sans adjuvant (SSP)	54
III.4.2	Les performances mécaniques des mortiers sans adjuvant (SSP)	56
III.4.2.1	Courbes (σ - ϵ) des mortiers sans adjuvant (SSP).....	56
III.4.2.2	Les performances mécaniques des mortiers sans adjuvant (SSP).....	59
III.4.2.3	Corrélation entre les performances mécaniques des mortiers sans adjuvants.....	62
III.5	FORMULATION DES MORTIERS AVEC ADJUVANT (SP)	62
III.6	EFFET DES ADDITIONS SUR MORTIERS AVEC ADJUVANTS (SP)	63
III.6.1	Besoin en adjuvants des mortiers à même consistance	63
III.6.2	Performances mécaniques des mortiers avec adjuvants (SP).....	64
III.7	CORRÉLATION ENTRE LES MORTIERS AVEC ADJUVANTS (SP) ET LES MORTIERS SANS ADJUVANTS (SSP)	67
III.8	CONCLUSION	71

Chapitre III

Effet des Additions sur les Mortiers

III.1. INTRODUCTION

L'objectif visé par ce chapitre est l'étude de l'effet des additions minérales sur les propriétés physico-mécaniques du mortier normal. Pour atteindre cet objectif : nous avons mesuré des paramètres qui caractérisent les pâtes et les mortiers avec additions minérales et nous sommes particulièrement intéressés aux propriétés suivantes :

- la consistance et le temps de prise des pâtes de liant (ciment + addition).
- la compacité et la maniabilité des mortiers frais, sans adjuvants, avec additions minérales de même consistance.
- les propriétés mécaniques des mortiers, sans adjuvants, avec additions minérales à 7 et à 28 jours.
- les propriétés mécaniques des mortiers, avec adjuvants, et additions minérales à 7 et à 28 jours.

III.2. EFFET DES ADDITIONS SUR LES PATES DE LIANT

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats des essais physiques effectués sur des pâtes de liants, composés de ciment et des additions minérales. Les additions étudiées sont le laitier granulé (La), la pouzzolane naturelle (Pz), le filler calcaire (Fc), la poudre de verre (Pv) et la fumée de silice (Fs). Ces additions minérales sont ajoutées en substitution de 10 % à 50 % du volume de ciment. L'effet de la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires et la quantité de l'addition incorporée sur la consistance normale et le temps de prise des pâtes de liant, a été étudiée.

III.2.1. Effet des additions minérales sur la consistance normale

La détermination de la consistance normale, selon la norme EN 196-3, permet de connaître l'effet de la nature minéralogique, des caractéristiques granulaires et la quantité de l'addition sur la demande en eau des pâtes des liants élaborés, d'une part, et elle permet de déterminer le rapport eau/liant (E/L) nécessaire pour élaborer des éprouvettes de mortier, d'autre part.

Les résultats des essais de la consistance normale sont présentés par la figure III. 1. Nous remarquons que la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires et la quantité de l'addition minérale incorporée influent sur la consistance du liant. Cette influence est peu sensible pour le cas de la pouzzolane naturelle (Pz) dont la demande en eau reste proche de celle de la pâte témoin (sans addition) quel que soit le taux de substitution de ciment par la pouzzolane naturelle. Une augmentation de la consistance est remarquée pour le cas des liants composés avec le filler calcaire (Fc) et la poudre de verre (Pv), la quantité d'eau accroît avec l'augmentation du taux de substitution de ciment par ces additions.

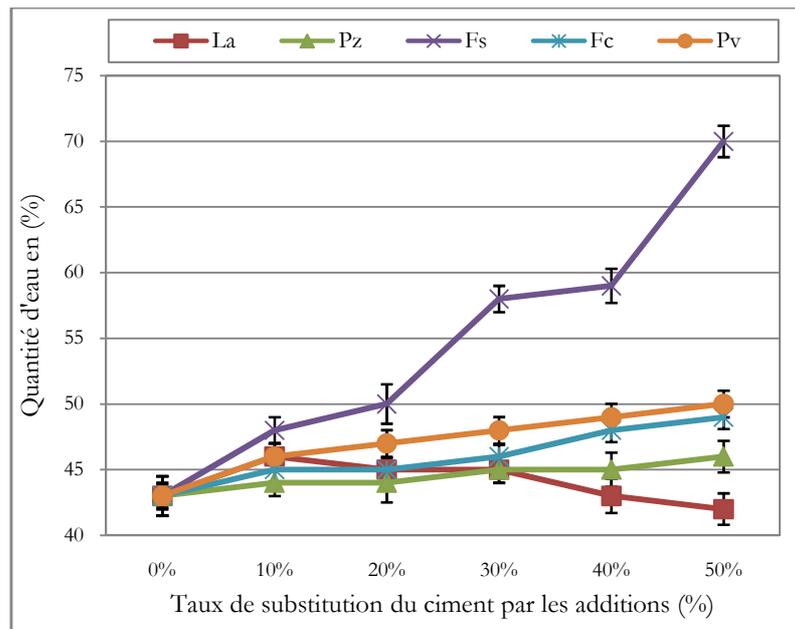


Figure III. 1. Effet des additions minérales sur la consistance normale des pâtes du liant, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions.

La fumée de silice (Fs) augmente fortement la demande en eau en atteignant 55 % et 70 % pour 30 % et 50 % de taux de substitution du ciment par l'addition, respectivement. Ceci est dû à la grande finesse de la fumée de silice qu'elle n'arrive pas à remplir les pores du squelette granulaire ni à absorber les quantités d'eau complémentaire et elle se traduit par une forte fluidité. La variation de la consistance des pâtes de liant avec le laitier granulé (La), présente une légère augmentation à 10 % du taux de substitution du ciment par l'addition, puis la quantité d'eau décroît progressivement, pour enregistrer une quantité inférieure à celle de la pâte de référence à 50 % de remplacement de ciment. Ce comportement est probablement dû à l'aspect hydraulique latent du laitier.

L'effet des additions minérales sur la consistance des pâtes du liant, est confirmé par plusieurs auteurs. Rao [Rao. G.A. 2003] a montré que la consistance de la pâte de ciment augmente avec l'augmentation du taux de la fumée de silice, en raison de sa grande finesse. Bonavetti, V., Rahhal, V., et Irassar, E [Bonavetti. V., et al. 2003], et El-Didamony, et El-Alfi [El-Didamony, et El-Alfi, 1999 et 2000] ont montré que le filler calcaire améliore la demande en eau. Xie, Z., Xiang, W. et Xi, Y. [Xie et al. 2003] et Jin, C., Meyer, C. et Baxter, S. [Jin et al., 2000] ont montré que l'incorporation de la poudre de verre a un effet négligeable sur la demande en eau.

III.2.2. Effet des additions minérales sur la prise du ciment

Les temps de début et de fin de prise du ciment mesurés conformément à la norme EN 196-3, sont présentés par la figure III. 2. Les résultats montrent une nette augmentation du temps de prise, proportionnellement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires et l'accroissement du taux de l'addition minérale incorporée dans le liant. Ceci permet de faire les constats suivants :

- la substitution progressive des volumes de ciment par les additions minérales retarde la prise de la pâte du liant élaboré. Ce retard devient de plus en plus important en augmentant le taux de substitution en cette addition notamment le laitier granulé (La), puis la poudre de verre (Pv) et le

filler calcaire (Fc), qu'elles présentent un comportement plus au moins similaire. Ceci laisse à supposer que l'action de ces additions minérales dans le ciment se limite essentiellement à une décélération du processus d'hydratation aux très jeunes âges, comme conséquence de la floculation de leurs grains. Ce phénomène est lié à la présence de charges électriques sur la surface des grains. Un certain volume d'eau est piégé à la surface de grains, ils deviennent de plus en plus nombreux si la surface spécifique est importante. Ainsi, le phénomène de floculation empêche l'eau d'hydrater certaines parties des surfaces des grains du liant qui se trouvent en quelque sorte soudés les uns aux autres par l'intermédiaire de ces charges électriques.

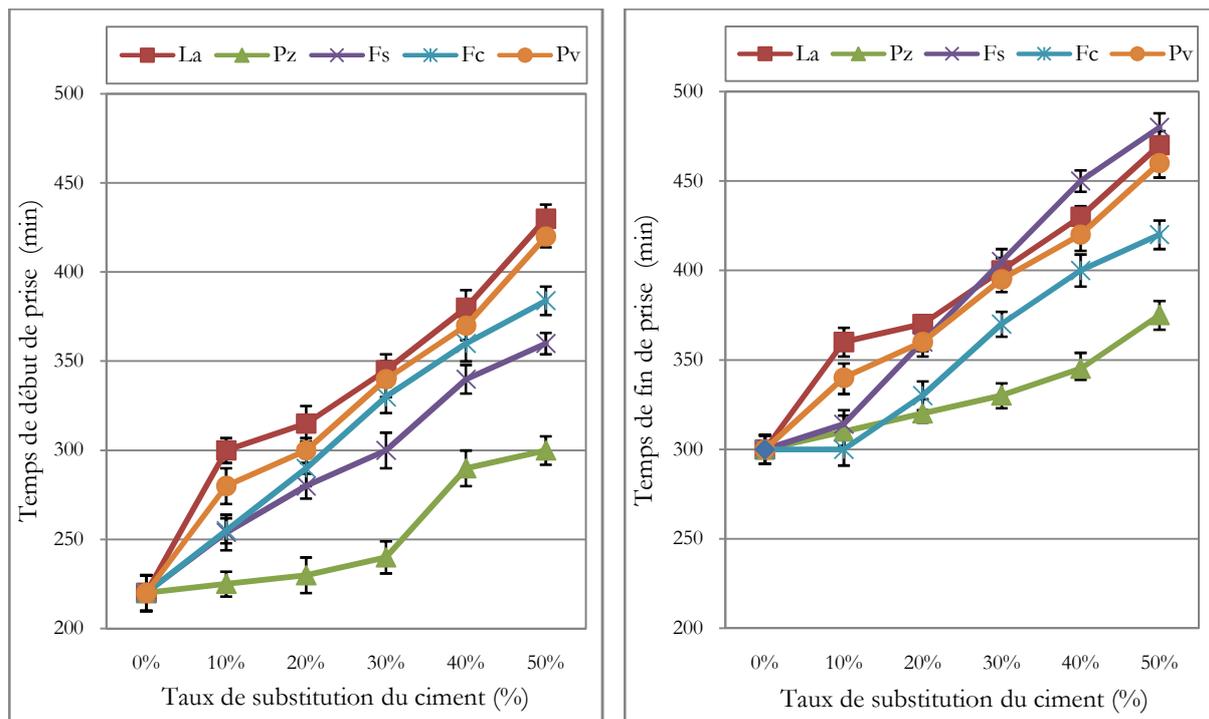


Figure III. 2. Effet des additions minérales sur le temps de la prise des pâtes de liant, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions.

- la pouzzolane naturelle (Pz), influe moins sur le temps de prise de liant, ceci est expliqué par la réaction de la pouzzolane naturelle avec la portlandite $[Ca(OH)_2]$ sortant de l'hydratation des silicates calciques du clinker pour former des C-S-H supplémentaires. Par conséquent, l'augmentation du taux de substitution de ciment par l'addition (> 30 %), entraîne une limitation de la quantité des hydrates formés au très jeune âge et conduise à un retard de la prise du liant élaboré.

- les liants composés avec du ciment et de la fumée de silice (Fs) qu'elle est une addition absorbante de l'eau, sont caractérisés par une prise lente.

L'effet des additions minérales sur la prise des pâtes du liant, est confirmé par plusieurs auteurs; Brooks, J., Megat Johari, M.A., et Mazloom, M. [Brooks. J., et al. 2000] ont montré que les ciments de laitier ont des temps de prise un peu plus longs que les ciments Portland sans ajouts, donc, le laitier a un effet retardateur de prise. Rao. G.A., [Rao. G.A., 2003] a également montré que le temps de début de prise diminue avec l'augmentation de la teneur en fumée de silice. L'effet de la fumée de silice se traduit par une prise rapide du ciment.

III.3. FORMULATION DES MORTIERS SANS ADJUVANTS (SSP)

Nous avons confectionné un mortier de référence, sans adjuvants, sans additions minérales, défini par la norme EN 196 - 1. En utilisant le sable normalisé élaboré (SN), puis les additions minérales sont incorporées dans le mortier de référence par substitution des volumes progressifs de ciment (10 %, 20 %, 30 %, 40 % et 50 %). La quantité d'eau déminéralisée a été ajustée jusqu'à l'obtention d'une consistance de référence qui a été choisie égale à un étalement de 115 mm sur la table à secousses pour mortiers (Tab III. 1).

Pour constituer une fonction de référence (SA) aux mortiers avec additions minérales, nous avons procédé à la substitution volumique progressive du ciment par le sable dans le mortier de référence jusqu'au taux de 50 % et on a relevé l'effet de cette substitution sur la compacité, la maniabilité et les résistances mécaniques des mortiers sans adjuvants.

Les procédures suivies pour la préparation des mortiers, la confection, des éprouvettes, de stockage, la vérification de la consistance de référence, et les mesures des résistances en compression ont été réalisées conformément à la norme EN 196-1 comme il a été exposé dans le chapitre II.

Tableau III. 1. Composition des mortiers sans adjuvant (quantités pour 3 éprouvettes 4x4x16 cm).

Mortier		Ciment (g)	Eau (l)	E/C	Granulat (g)	Additions minérales	
						(%)	Quantité (g)
01	0 %	450	195	0.43	1350	0	0
02	La 10 %	405	205	0.51	1350	10	43.650
03	La 20 %	360	200	0.56	1350	20	87.300
04	La 30 %	315	199	0.63	1350	30	130.95
05	La 40 %	270	190	0.70	1350	40	174.60
06	La 50 %	225	185	0.82	1350	50	218,30
07	Pz 10 %	405	195	0.48	1350	10	39.750
08	Pz 20 %	360	195	0.54	1350	20	79.50
09	Pz 30 %	315	195	0.62	1350	30	119.25
10	Pz 40 %	270	195	0.72	1350	40	159.00
11	Pz 50 %	225	195	0.87	1350	50	198.75
12	Fs 10 %	405	211	0.52	1350	10	33.60
13	Fs 20 %	360	215	0.60	1350	20	67.20
14	Fs 30 %	315	243	0.77	1350	30	100.8
15	Fs 40 %	270	240	0.89	1350	40	134.4
16	Fs 50 %	225	275	1.22	1350	50	168.3
17	Fc 10 %	405	180	0.45	1350	10	40.25
18	Fc 20 %	360	185	0.51	1350	20	80.31
19	Fc 30 %	315	190	0.60	1350	30	120.75
20	Fc 40 %	270	190	0.70	1350	40	170.32
21	Fc 50 %	225	195	0.87	1350	50	225.41
22	Pv 10 %	405	200	0.49	1350	10	35.22
23	Pv 20 %	360	210	0.58	1350	20	65.60
24	Pv 30 %	315	220	0.70	1350	30	110.50
25	Pv 40 %	270	225	0.83	1350	40	156.15
26	Pv 50 %	225	230	1.02	1350	50	185.25
27	SA 10 %	405	200	0.49	1350	10	37.50
28	SA 20 %	360	210	0.58	1350	20	75.00
29	SA 30 %	315	230	0.73	1350	30	112.5
30	SA 40 %	270	235	0.87	1350	40	150.00
31	SA 50 %	225	250	1.11	1350	50	187.50

III.4. EFFET DES ADDITIONS SUR LES MORTIERS SANS ADJUVANTS (SSP)

Pour étudier l'effet des additions minérales sur les propriétés des mortiers sans adjuvant, nous avons mesuré les paramètres qui caractérisent les propriétés physico-mécaniques des mortiers et nous nous sommes particulièrement intéressés aux propriétés suivantes :

- la compacité des mélanges frais des mortiers sans adjuvant à même consistance.
- la maniabilité des mortiers frais sans adjuvant à même consistance.
- la variation des performances mécaniques des mortiers sans adjuvants avec additions minérales à 7 et à 28 jours.

III.4.1. Effet des additions sur les mortiers frais sans adjuvant (SSP)

III.4.1.1. La compacité des mortiers frais sans adjuvant (SSP)

La compacité des mortiers à l'état frais a été calculée à partir des masses volumiques apparentes des mortiers à l'état frais, en tenant compte des masses volumiques absolues des constituants solides, elle est exprimée en pourcentage (%). La variation de la compacité des mortiers frais, à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment par les additions est représentée par la figure III. 3.

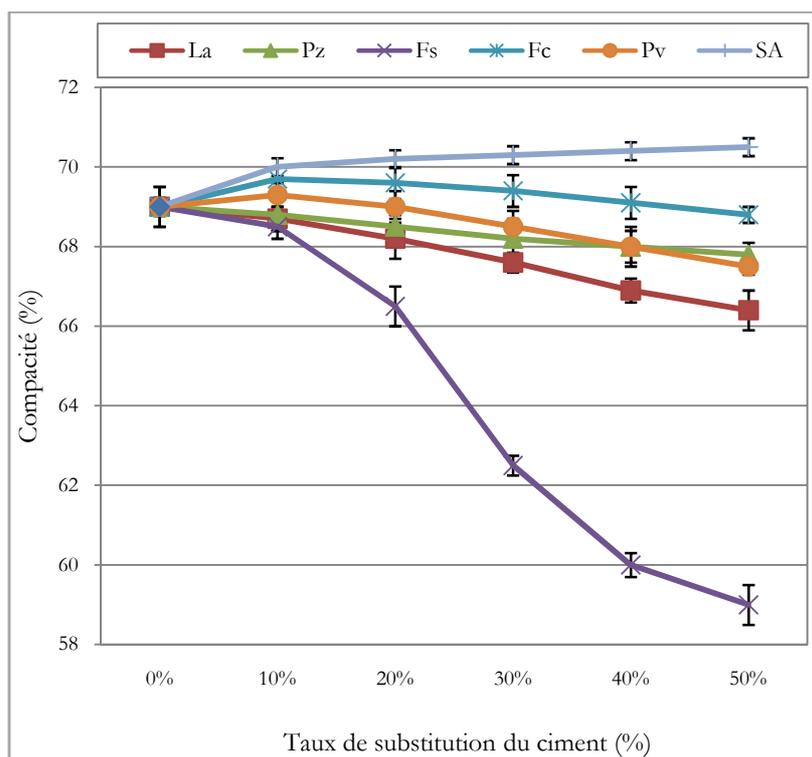


Figure III. 3. Variation de la compacité des mortiers à l'état frais, à même consistance en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

Nous remarquons que la compacité des mortiers frais avec la fumée de silice (Fs) est décroissante en raison de l'influence des forces inter-particulaires et aux tensions superficielles de la phase liquide. La compacité des mortiers frais avec les autres additions minérales reste comparable à celle de mortier de référence. Ceci peut être confirmé par l'étude de la maniabilité des mortiers.

III.4.1.2. La maniabilité des mortiers frais sans adjuvant (SSP)

La substitution du ciment par des additions minérales, volume par volume en préservant un volume absolu des composants solides constants, engendre une variation de la maniabilité du mélange frais caractérisée par l'étalement sur la table à secousses des mortiers. La variation de l'étalement des mortiers frais avec additions minérales est représentée par la figure III. 4.

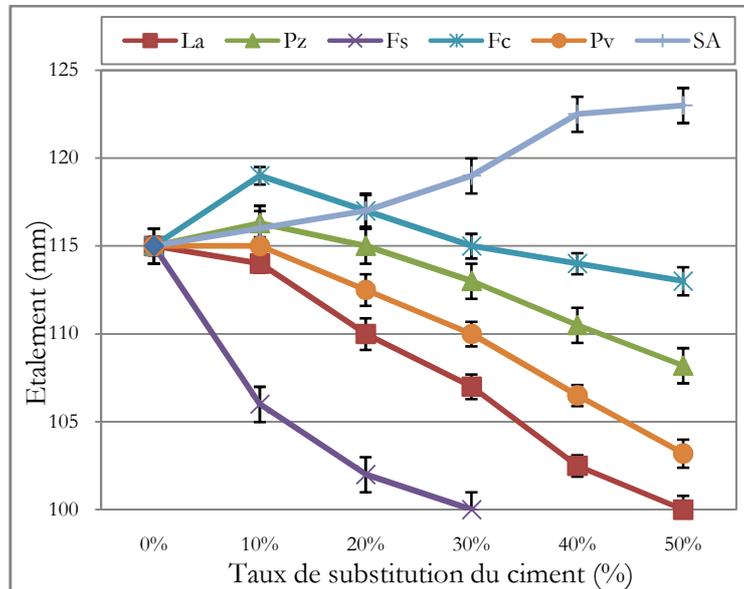


Figure III. 4. Variation de l'étalement sur la table à secousses des mortiers frais, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

Nous constatons sur la figure III. 4, que l'étalement du mortier frais avec les fillers calcaires (Fc) et celui du mortier frais avec la pouzzolane naturelle (Pz), 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. Ceci montre, que l'incorporation de ces additions minérales dans les mortiers à faibles taux de substitution du ciment, améliore la maniabilité, puis les mélanges cimentaires deviennent plus ferme à plus forts taux de substitution. Les mortiers frais avec la poudre de verre (Pv), le laitier granulé (La) et la fumée de silice (Fs), présentent un étalement qui décroît directement avec l'augmentation de la quantité d'additions dans le mélange. Ainsi l'incorporation des additions minérales dans les mortiers rend les mélanges cimentaires beaucoup plus fermes. Le mortier sans additions minérales (SA) présente un comportement différent. En effet, la substitution du ciment par le sable engendre une amélioration continue de l'ouvrabilité.

Nos résultats rejoignent les résultats obtenus par Tikalsky, P., et Freeman, R.L. [Tikalsky, P., et Freeman, R.L., 1998] qui, ont montré que l'incorporation du laitier améliore la maniabilité. Rao, G.A. [Rao, G.A. 2003] a montré que l'ouvrabilité du mortier a légèrement diminué avec l'augmentation de la teneur en fumée de silice, cela est dû à la surface spécifique plus élevée de la fumée de silice, qui nécessite plus d'eau pour une hydratation complète et une bonne ouvrabilité. Bonavetti, V., Donza, H., Mendez, G., Carbera, O., et Irassar, E. [Bonavetti, V., et al. 2003], El-Didamony, et El-Alfi [El-Didamony, et El-Alfi, 1999 et 2000] et Tezuka, Y., Gomes, D., Martins, D., et Djanikin, J. [Tezuka, Y., et al. 1992] ont montré que la maniabilité des mortiers avec les fillers calcaires était améliorée par rapport au mortier de référence avec la même consistance. Les travaux de Meyer, C. et Baxter, S. [Meyer et Baxter 1997] et Yamada, K. et Ishiyama, S. [Yamada

et Ishiyama 2005] montrent que l'augmentation du taux de substitution du ciment par la poudre de verre n'engendre qu'une légère diminution de l'ouvrabilité.

Pour donner aux mortiers avec additions minérales la consistance de référence, la quantité d'eau dans les mélanges doit être ajustée. Ceci entraîne une variation du besoin en eau des mortiers à même consistance, définie par la variation du rapport volumique de la quantité d'eau par la quantité de liant (e/l), évaluée en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales, présenté par la figure III. 5.

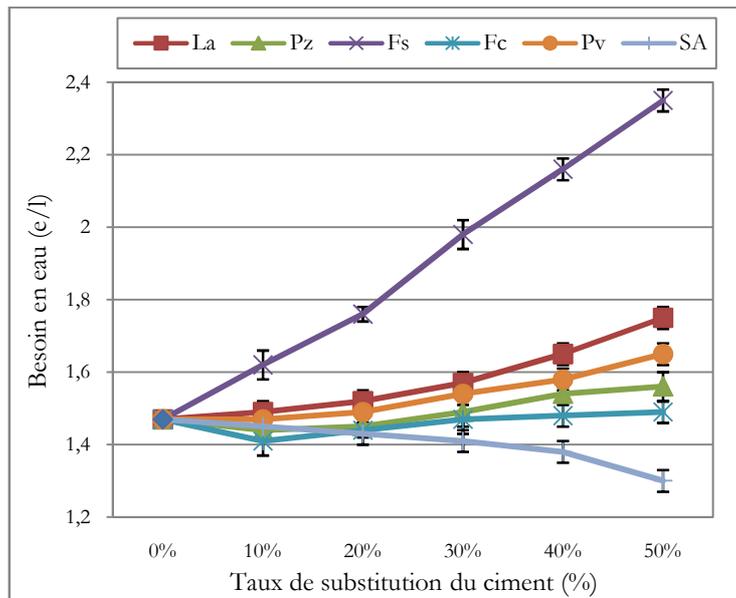


Figure III. 5. Variation du besoin en eau des mortiers à même consistance, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions

Nous pouvons constater sur la figure III. 5, que le besoin en eau des mortiers avec additions minérales varie sensiblement avec la nature minéralogique et la quantité de l'addition incorporée dans le mélange. Les mortiers avec le laitier granulé (La), la poudre de verre (Pv), la pouzzolane naturelle (Pz) et les fillers calcaires (Fc) présentent un besoin en eau plus ou moins proche de celui du mortier de référence, pour des taux de substitution du ciment, inférieurs à 20 %. À plus forts taux de substitution du ciment par ces additions minérales, le besoin en eau croît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange. Ce comportement indique une optimisation du squelette granulaire à faibles taux de substitution du ciment. Les particules de l'addition remplissent une partie de la porosité inter-granulaire du squelette solide et libèrent l'eau remplissant habituellement ces pores. À plus forts taux de substitution, les particules absorbent des quantités d'eau complémentaires, et engendrent un fort besoin en eau, à même consistance.

On peut également noter que les mortiers avec la fumée de silice (Fs), présentent les besoins en eau les plus importants en accord avec sa grande finesse. Ce besoin en eau est d'autant plus important que le taux de substitution du ciment est grand. Cette plus grande quantité d'eau dans les mortiers avec la fumée de silice (Fs) est nécessaire pour la lubrification des particules ultra-fines et pour leur dispersion dans l'eau de gâchage afin de donner au mélange la consistance de référence. Le mortier sans additions minérales (SA) présente un besoin en eau décroissant, ce qui

suggère un arrangement favorable de la structure granulaire, lorsque le ciment est substitué par des grains de sable plus grossiers.

En effet, il a été montré par Bessa-Badreddine [Bessa-Badreddine, A., 2004] et Felekoglu B., Tosun K., Baradan B., Altun A., Uyulgan B., [Felekoglu. B., et al, 2006] que le laitier granulé présente un besoin en eau plus important que les fillers calcaires ou la pouzzolane naturelle. Car, la forme irrégulière du laitier granulé demande une lubrification plus importante que les additions minérales de formes angulaires ou arrondies, à même finesse. Schiller et Ellerbrock [Schiller et Ellerbrock, 1992], Tezuka, Y., Gomes, D., Martins, D., et Djanikin, J. [Tezuka, Y., et al. 1992] et Kenai, S., Soboyejo, W., et Soboyejo, A. [Kenai, S., et al. 2004] ont montré que l'incorporation de 5 à 20 % de filler calcaire augmente la demande en eau.

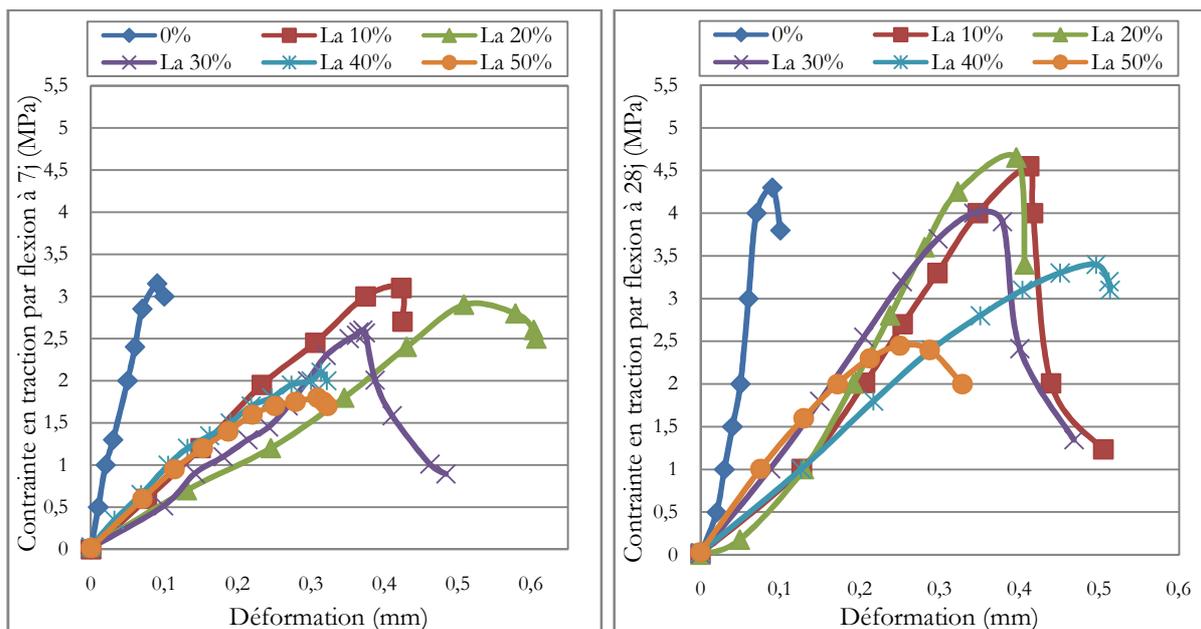
Il en résulte que le besoin en eau des mortiers avec additions minérales est directement lié à la compacité et il suit une variation opposée. La très bonne correspondance entre le besoin en eau et la compacité dans des mortiers avec additions minérales, est due au fait que le serrage de la structure granulaire des mortiers lors de la mise en place dans les moules reste équivalent, indépendamment de la nature et des caractéristiques des additions minérales, en raison du maintien de la même consistance pour tous les mélanges frais.

III.4.2. Les performances mécaniques des mortiers sans adjuvant (SSP)

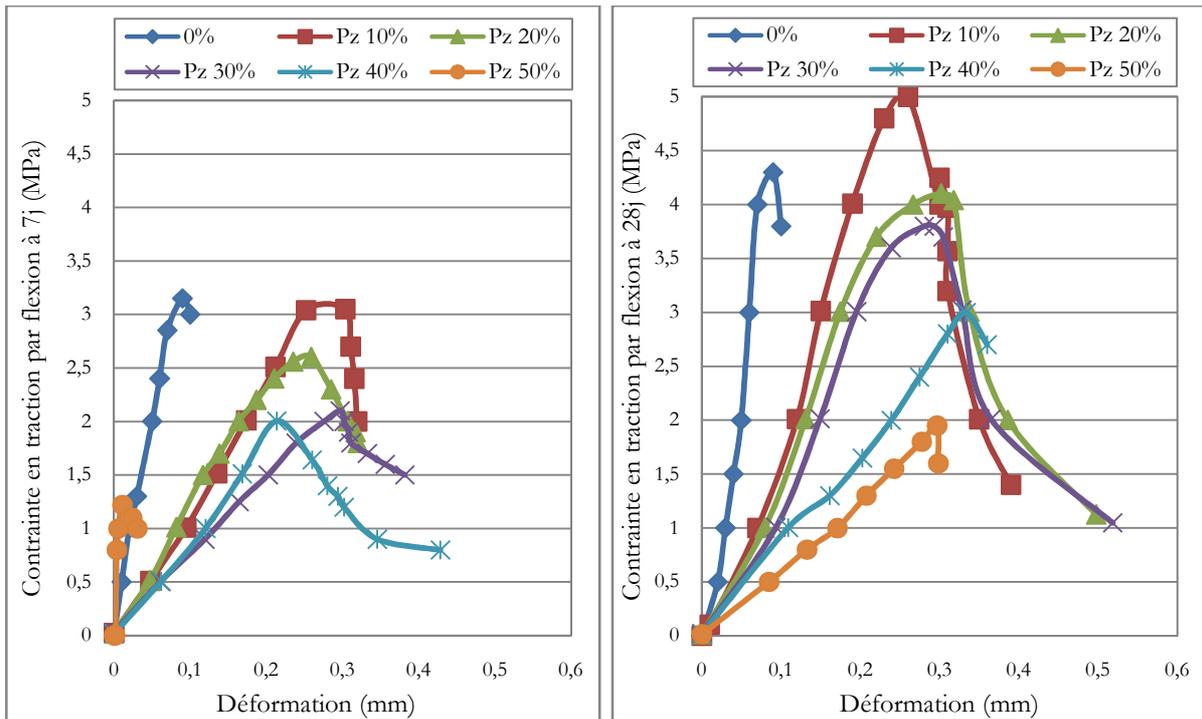
La substitution du ciment par les additions minérales en préservant un volume absolu des composants solides constants, engendre une variation des propriétés mécaniques des mortiers. Nous avons mesuré plusieurs paramètres tels que la courbe contrainte-déformation en traction par flexion, les résistances à la traction et en compression, le module d'élasticité, à 7 et à 28 jours.

III.4.2.1. Courbes (σ - ϵ) des mortiers sans adjuvant (SSP)

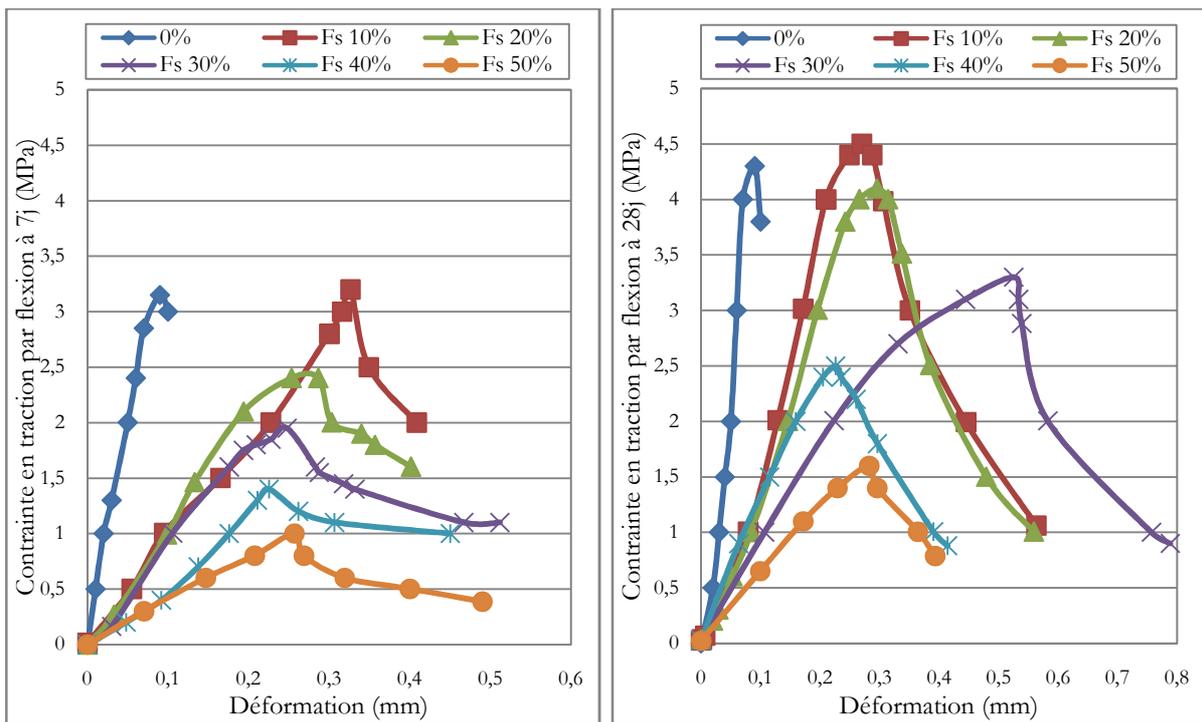
Les courbes contraintes-déformations en traction par flexion à 7 et à 28 jours des mortiers sans adjuvant (SSP) avec différents taux de substitution de ciment par les additions minérales sont représentées par la figure III. 6.



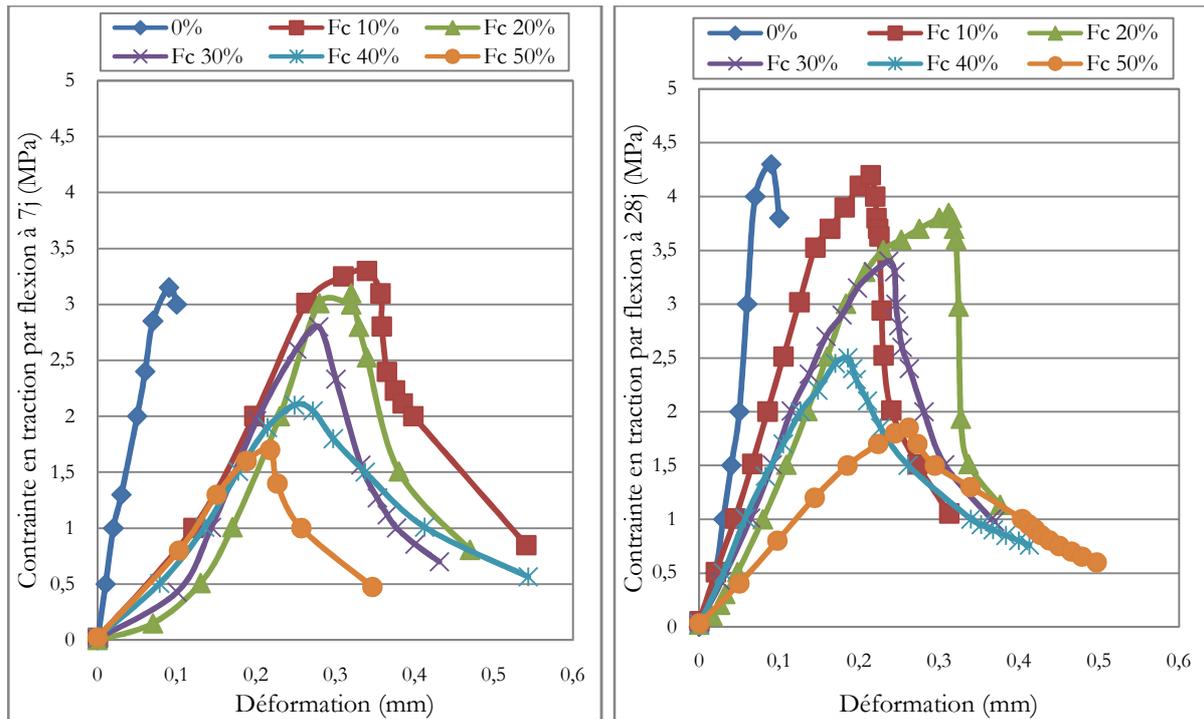
a) Mortiers avec le laitier granulé (La)



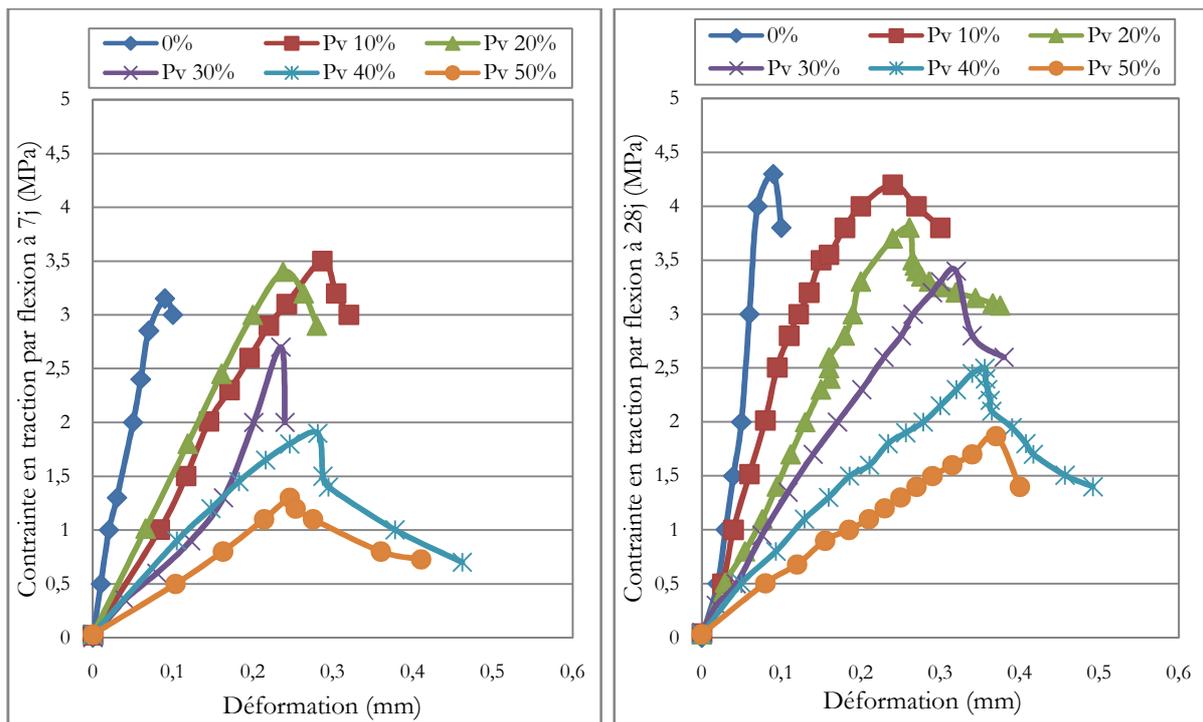
b) Mortiers avec la pouzzolane naturelle (Pz).



c) Mortiers avec la fumée de silice (Fs)



d) Mortier avec les fillers calcaires (Fc).



e) Mortiers avec la poudre de verre (Pv)

Figure III. 6. Courbes contraintes-déformations en traction par flexion des mortiers sans adjuvants (SSP) avec différents taux de substitution de ciment par les additions minérales à 7 et à 28 jours.

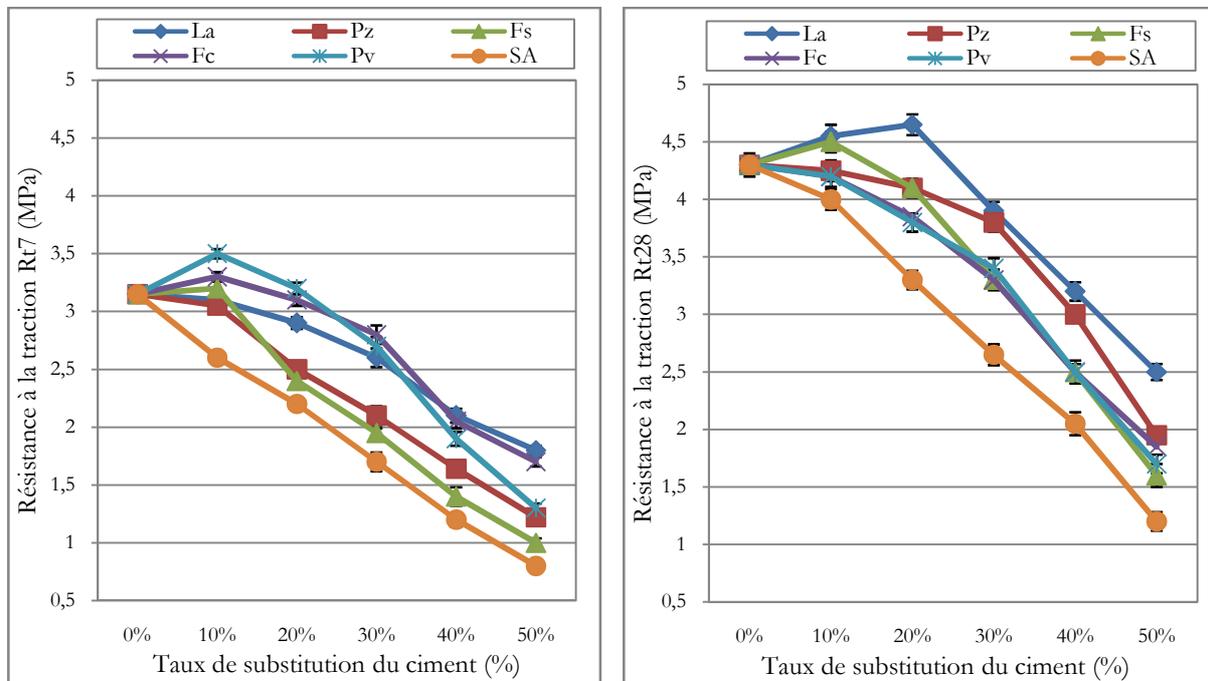
On constate que la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires et la quantité de l'addition minérale incorporée influent sur la variation des courbes contraintes-déformations en traction par flexion des mortiers sans adjuvant (SSP). Globalement, le comportement des mortiers est linéaire élastique jusqu'à environ 30 % de la résistance maximale, au-delà de la valeur-limite d'élasticité, les courbes contrainte-déformation enregistrent une augmentation graduelle en courbure évaluée autour de 75 % à 90 % de la résistance ultime, après la phase de rupture, le mortier présente une déformation contrôlée jusqu'à la ruine totale.

La comparaison des courbes contraintes-déformations entre les mortiers testés à 7 et à 28 jours, nous a permis de confirmer que la substitution partielle de 10 -50 % du volume de ciment par les additions minérales, améliore considérablement la résistance à la traction par flexion, ainsi que la ductilité des mortiers, et cela apparaît clairement à travers l'écart des courbes contraintes-déformations des mortiers avec les additions minérales par rapport à la courbe contrainte-déformation du mortier de référence (sans additions minérales).

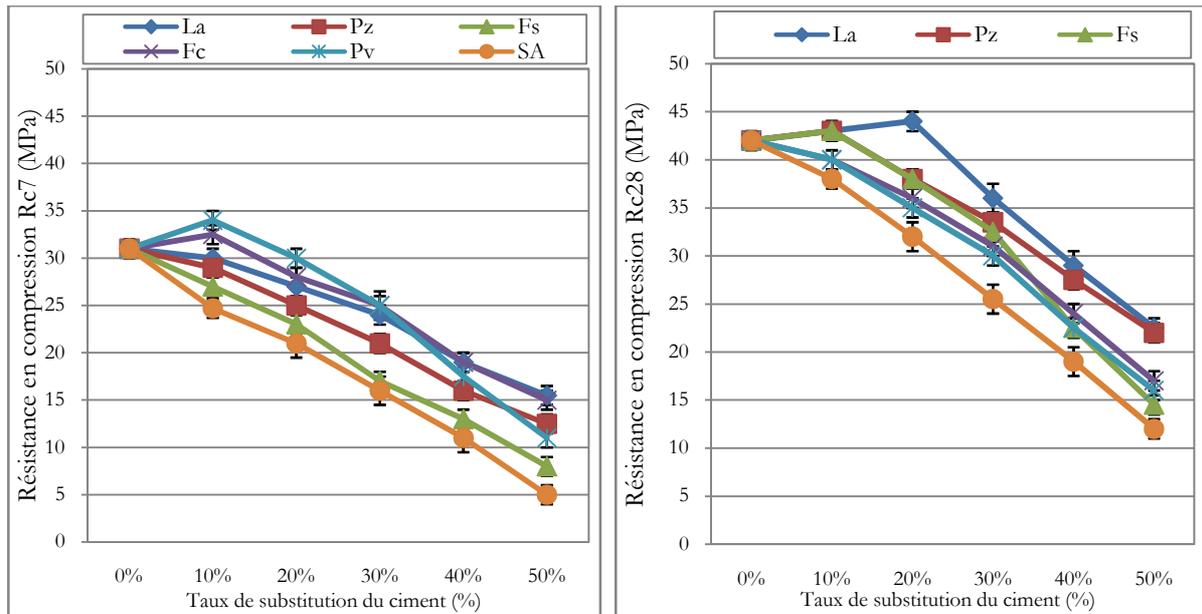
Le comportement des mortiers à 7 jours est similaire pour toutes les additions, à 28 jours, les mortiers avec le laitier granulé (La), les mortiers avec la pouzzolane naturelle (Pz) et les mortiers avec la fumée de silice (Fs) présentent un comportement plus important que les mortiers avec les fillers calcaires (Fc) et les mortiers avec la poudre de verre (Pv), en raison probablement de la réaction pouzzolanique.

III.4.2.2. Les performances mécaniques des mortiers sans adjuvant (SSP)

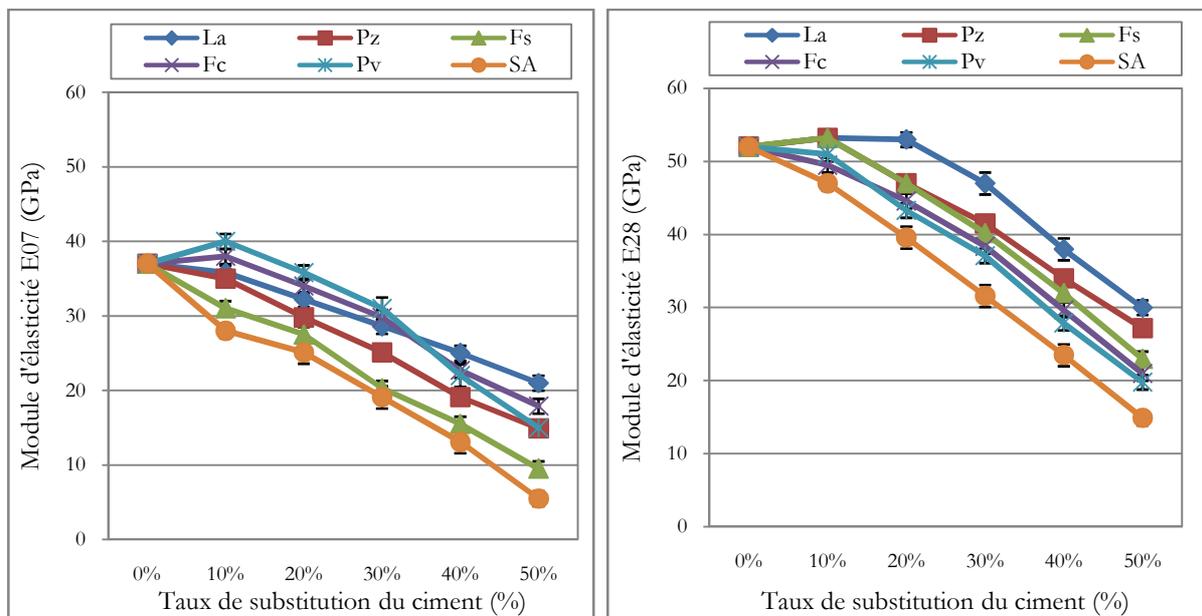
Les variations des performances mécaniques à 7 et à 28 jours des mortiers sans adjuvant (SSP) sont représentées en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales à la figure III. 7.



a) Résistances à la traction.



b) Résistances en compression.



c) Modules d'élasticité

Figure III. 7. Variation des performances mécaniques à 7 et à 28 jours des mortiers sans adjuvants (SSP), en fonction du taux de substitution du ciment par les additions.

Nous remarquons que les performances mécaniques, à 7 et à 28 jours des mortiers sans adjuvant (SSP) avec additions minérales varient sensiblement avec la nature minéralogique et la quantité d'additions incorporée dans le mélange. À 7 jours, les performances mécaniques pour les mortiers avec les fillers calcaires (Fc) et les mortiers avec la poudre de verre (Pv), croissent pour atteindre un maximum au taux de 10 %, puis commencent à décroître proportionnellement aux taux de substitution du ciment, avec une intensité plus importante pour les mortiers avec la poudre de verre (Pv), en raison de ces forts besoins en eau de plus en plus croissants. Pour les mortiers avec la pouzzolane naturelle (Pz), les mortiers avec le laitier granulé (La) et les mortiers avec la fumée

de silice, les performances mécaniques diminuent directement sans aucune inflexion favorable enregistrée. Cette décroissance est proportionnelle aux taux de substitution du ciment et elle est plus accentuée pour les mortiers avec la fumée de silice en raison des forts besoins en eau utilisés pour conférer aux mortiers la consistance de référence. La décroissance des performances mécaniques pour les mortiers avec le laitier granulé est la moins accentuée. À 28 jours, les performances mécaniques pour les mortiers avec les fillers calcaires, et les mortiers avec la poudre de verre, diminuent directement sans aucune amélioration et ils descendent au-dessous des performances du mortier de référence à partir de 20 % du taux de substitution du ciment. Pour les mortiers avec la pouzzolane naturelle, les performances mécaniques affichent une légère amélioration à 10 % du taux de substitution du ciment, puis elles décroissent. Pour les mortiers avec le laitier granulé et les mortiers avec la fumée de silice, les performances mécaniques présentent une légère évolution à 20 % du taux de substitution du ciment.

Nous pouvons donc déduire que l'action des fillers calcaires et de la poudre de verre sur le mortier est limitée principalement à une accélération du processus d'hydratation au jeune âge, et à faible taux de substitution du ciment. L'action de la pouzzolane naturelle est meilleure à 28 j qu'à 7 j, grâce à l'effet tardif de la réaction pouzzolanique. L'incorporation du laitier granulé dans les mortiers à des taux (< 20 %) limite la chute des performances mécaniques à 7 j et procure un léger gain des performances mécaniques à 28 jours, en raison de leurs propriétés hydrauliques latentes. L'action de la fumée de silice sur les mortiers se caractérise par une chute des performances mécaniques à 7 j et un léger gain à 28 j. Car les grains ultrafins de la fumée de silice pénètrent entre les hydrates du ciment et empêchent leur l'hydratation. Par contre, le développement de l'action pouzzolanique de la fumée de silice permet d'améliorer les performances mécaniques par rapport au mortier sans additions, quoique son effet sur le ciment se trouve atténué par les besoins en eau importants.

La contribution des additions minérales à l'amélioration des performances mécaniques, est confirmée par plusieurs auteurs. En effet Dubosc. A [Dubosc. A., 1998] a montré que les ciments aux laitiers présentent de très fortes résistances finales. Les travaux réalisés par Mebrouki, A., Belas Belaribi, N., Bouhamou, N., et Cyr, M. [Mebrouki, A., et al. 2004], Aichouba, A [Aichouba, A. 2005], Senhadji, Y., [Senhadji, Y., 2006], Ghrici, M., [Ghrici, M., 2006] et Kaid, N., Cyr, M., Julien, S., et Khelafi, H. [Kaid, N., et al. 2009] sur des mortiers et des bétons, ont montré que le remplacement partiel de ciment par la pouzzolane naturelle de Béni-Saf améliore leurs performances mécaniques. Huang et Feldman [Huang et Feldman, 1985] et Hooton [Hooton, 1993] ont également montré que l'ajout de 30 % de la fumée de silice dans un mortier entraînait des meilleures performances mécaniques. Soroka et Stern [Soroka et Stern 1976] ont trouvé que les fillers calcaires augmente la densité du mortier, et diminue leur perméabilité, ce qui peut contribuer à l'amélioration de la résistance. Selon Livesy. P., [Livesy. P., 1991], Schmidt, M. [Schmidt, M. 1992], Soroka et Stern [Soroka et Stern, 1976], Boudchicha, A., Cheikh Zouaoui, M., Gallias, J.-L., et Mezghiche, B., [Boudchicha. A et al 2007] et Boubekour T, Boulekbache, B, et Makhelouf. A., [Boubekour. T., et al 2010] ont montré que la substitution de ciment jusqu'à 10 % par des fillers calcaires ne réduit pas la résistance du béton, tandis qu'aux plus hauts taux de substitution, la résistance est généralement diminuée. D'autre part, Batayneh, M., Marie, I. et Asi, I. [Batayneh et al., 2007] et Nishikawa, T., Takatsu, M. et Daimon, M. [Nishikawa et al., 1995] ont

montré que les résistances des mortiers augmentent proportionnellement avec l'augmentation du taux de la substitution du ciment par la poudre de verre.

III.4.2.3. Corrélation entre les performances mécaniques des mortiers sans adjuvants (SSP)

La relation entre les résistances en compression et les résistances à la traction des mortiers avec additions minérales sans adjuvant (SSP) à 7 et 28 jours, peut-être étudiée en analysant la corrélation de ces résistances (Figure III. 8) :

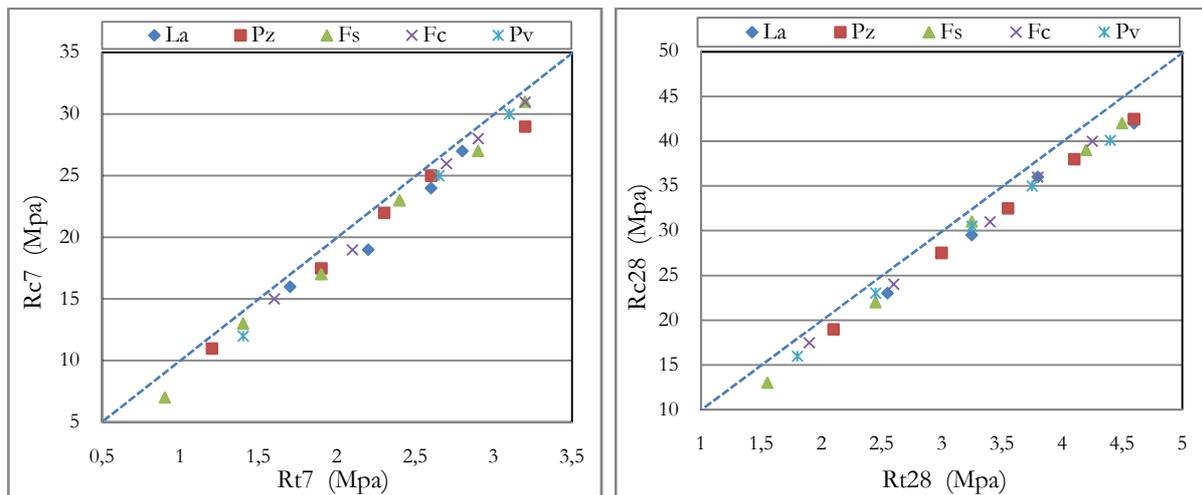


Figure III. 8. Corrélation entre les résistances en compression et les résistances à la traction à 7 et à 28 jours, des mortiers sans adjuvants avec des additions.

Nous remarquons qu'il existe une forte corrélation entre les résistances en compression et les résistances à la traction à 7 et à 28 jours, des mortiers sans adjuvant avec additions minérales. Car tous les points expérimentaux des résistances suivent une droite parallèle à la bissectrice d'équation $R_{Comp} = 10 \cdot R_{traction}$, du côté de l'axe des résistances à la traction. Ceci montre, que les résistances à la traction avoisinent le dixième des résistances en compression.

III.5. FORMULATION DES MORTIERS AVEC ADJUVANT (SP)

Dans ce qui suit, la méthodologie précédente sera reconduite, mais la quantité d'eau dans les mélanges cimentaires demeure constante pour toutes les formulations. L'ouvrabilité des mélanges sera maintenue constante par l'introduction d'adjuvants superplastifiants, dans ce cas :

- le volume absolu des constituants solides de la matrice cimentaire dans les différents mortiers reste constant.
- la compacité du squelette granulaire à l'état frais est maintenue constante.
- la lubrification des grains solides demeure équivalente pour toutes les formulations, permettant ainsi la mise en place et le serrage des mortiers dans les moules de manière similaire.

La composition des mortiers avec additions minérales et adjuvant (SP) présenté par le tableau III. 2, a été obtenue par l'introduction des quantités croissantes de superplastifiant SP (MEDAPLAST SP40) dans le mortier de référence sans additions minérales, en utilisant une quantité d'eau plus faible que celle nécessaire pour le gâchage du mortier sans additions minérales

et sans adjuvants (SSP), en suivant les procédures définies par la norme EN 196-1 décrites au chapitre II. Puis, nous avons maintenu dans toutes les formulations des mortiers avec additions minérales cette quantité d'eau, ce qui a nécessité l'incorporation d'une certaine quantité d'adjuvant nécessaire pour acquérir la consistance de référence qui a été choisie égale à un étalement de 115 ± 1 mm sur la table à secousses.

Tableau III. 2. Composition des mortiers avec adjuvant (quantités pour 3 éprouvettes 4x4x16 cm)

Mortier		Ciment (g)	Eau (l)	E/C	Granulat (g)	Additions minérales		Adjuvant (g)
						(%)	Quantité (g)	
01	0 %	450	195	0.43	1350	0	0	1.80
02	La 10 %	405	195	0.43	1350	10	43.65	2.02
03	La 20 %	360	195	0.43	1350	20	87.30	2.68
04	La 30 %	315	195	0.43	1350	30	130.95	3.57
05	La 40 %	270	195	0.43	1350	40	174.60	6.45
06	La 50 %	225	195	0.43	1350	50	218.30	9.97
07	Pz 10 %	405	195	0.43	1350	10	39.75	1.56
08	Pz 20 %	360	195	0.43	1350	20	79.50	1.76
09	Pz 30 %	315	195	0.43	1350	30	119.25	2.17
10	Pz 40 %	270	195	0.43	1350	40	159.00	2.57
11	Pz 50 %	225	195	0.43	1350	50	198.75	2.97
12	Fs 10 %	405	195	0.43	1350	10	33.60	4.82
13	Fs 20 %	360	195	0.43	1350	20	67.20	9.40
14	Fs 30 %	315	195	0.43	1350	30	100.80	-
15	Fs 40 %	270	195	0.43	1350	40	134.40	-
16	Fs 50 %	225	195	0.43	1350	50	168	-
17	Fc 10 %	405	195	0.43	1350	10	40	1.11
18	Fc 20 %	360	195	0.43	1350	20	80	1.32
19	Fc 30 %	315	195	0.43	1350	30	120	1.83
20	Fc 40 %	270	195	0.43	1350	40	170	2.02
21	Fc 50 %	225	195	0.43	1350	50	225	2.16
22	Pv 10 %	405	195	0.43	1350	10	35	1.76
23	Pv 20 %	360	195	0.43	1350	20	65	2.13
24	Pv 30 %	315	195	0.43	1350	30	110	2.55
25	Pv 40 %	270	195	0.43	1350	40	156	3.41
26	Pv 50 %	225	195	0.43	1350	50	185	5.54

III.6. EFFET DES ADDITIONS SUR MORTIERS AVEC ADJUVANTS (SP)

III.6.1. Besoin en adjuvants des mortiers à même consistance

La substitution volumétrique du ciment par des additions minérales dans les mortiers avec adjuvants superplastifiants (SP), en préservant la même consistance, engendre une variation du besoin en adjuvant. Ce besoin en adjuvant est défini comme la quantité d'adjuvant (A) par la quantité de liant (ciment+addition) (L). La variation du besoin en adjuvant, nécessaire pour conférer aux mortiers avec additions minérales de même consistance (A/L (%)), et est représentée par la figure III. 9.

Nous remarquons que le besoin en adjuvants des mortiers avec additions minérales varie sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires et la quantité des additions minérales incorporées dans le mélange. La variation du besoin en adjuvant suit globalement la variation du besoin en eau des mortiers avec additions minérales sans adjuvants superplastifiants. Les mortiers avec la pouzzolane naturelle (Pz) et les mortiers avec les fillers calcaires (Fc), présentent un besoin en adjuvants plus faibles que le mortier de référence pour des

taux inférieurs à 10 %. Au-delà de 20 % du taux de substitution du ciment, le besoin en adjuvants commence à croître dans des proportions modérées, ceci confirme une optimisation de l'arrangement spatial des particules dans le mélange.

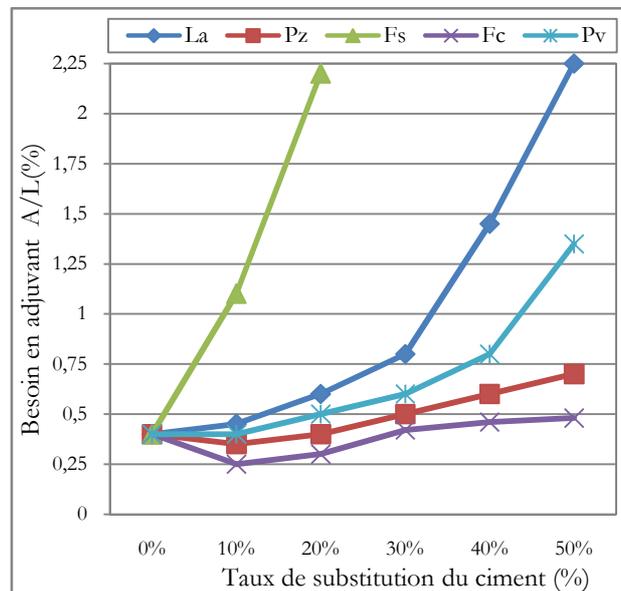


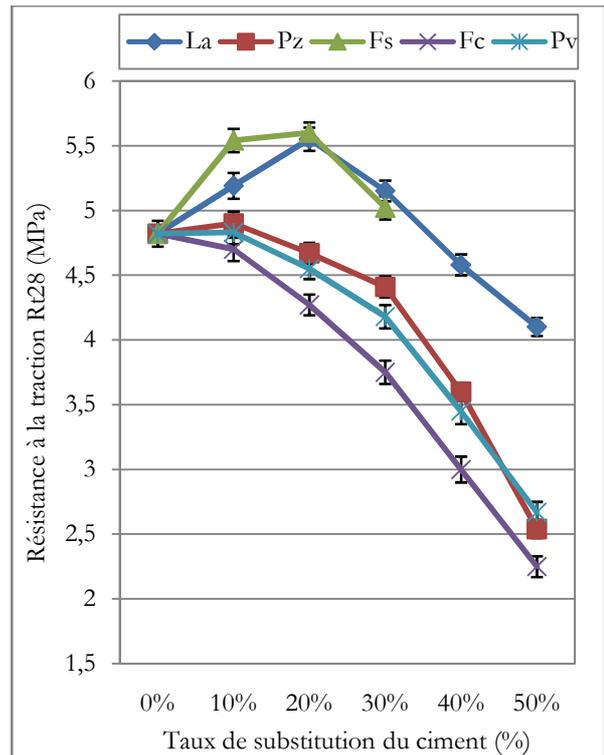
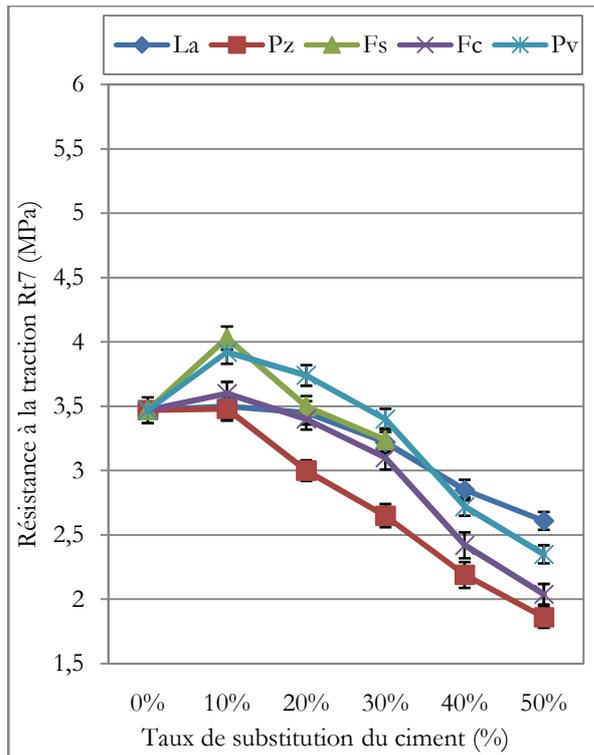
Figure III. 9. Variation du besoin en adjuvant des mortiers avec additions à même consistance, en fonction du taux de substitution du ciment

Les mortiers avec la poudre de verre (Pv) et les mortiers avec le laitier granulé (La), présentent un besoin en adjuvants qui croît avec le taux de substitution du ciment. Ce comportement est probablement dû à l'irrégularité des particules des additions. Les mortiers avec la fumée de silice (Fs), présentent les besoins en adjuvant les plus importants, ce besoin en adjuvant est d'autant plus important que la quantité de la fumée de silice (Fs) dans le mélange est importante, et il commence à sortir de la plage recommandée par le fabricant à partir de 20 % du taux de substitution du ciment, ce comportement est peut-être attribué au phénomène de floculation qui nécessite des quantités d'adjuvant plus importantes pour lubrifier l'ensemble des particules et assurer leur dispersion dans la structure granulaire.

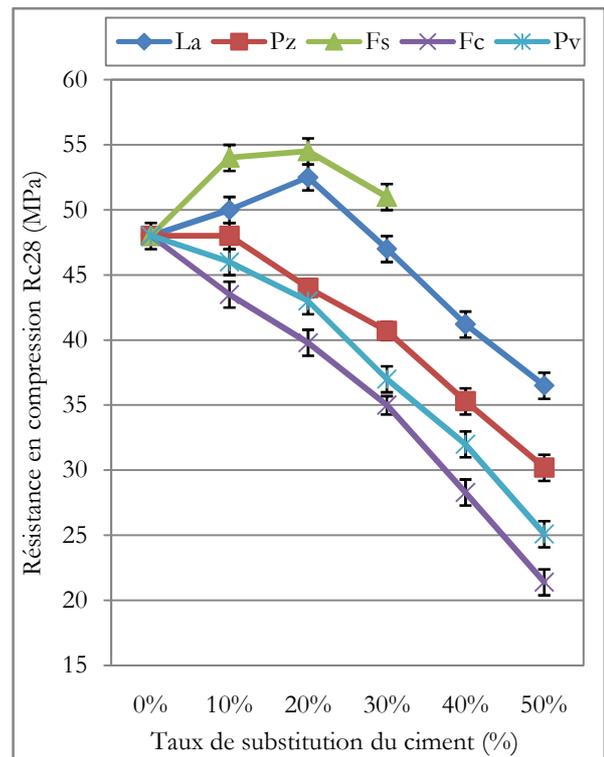
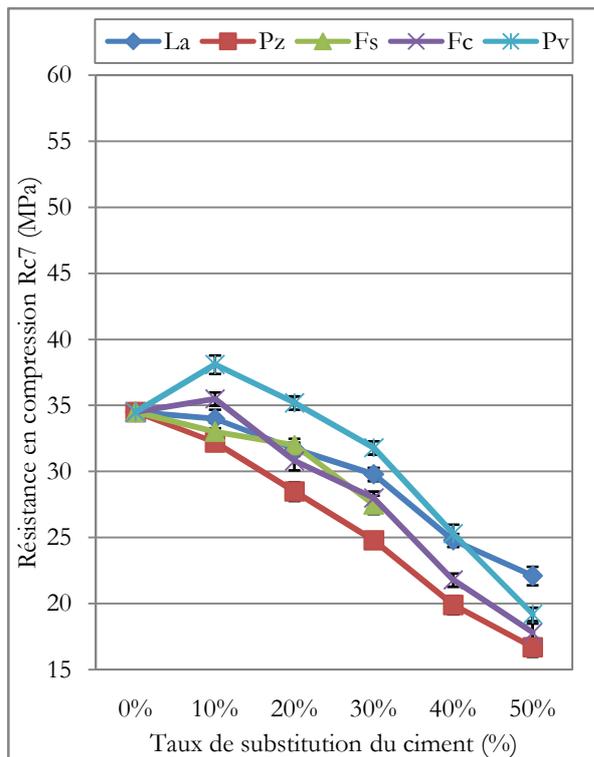
III.6.2. Performances mécaniques des mortiers avec adjuvants (SP)

Les variations des performances mécaniques à 7 et à 28 jours des mortiers avec adjuvants sont représentées en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales à la figure III. 10.

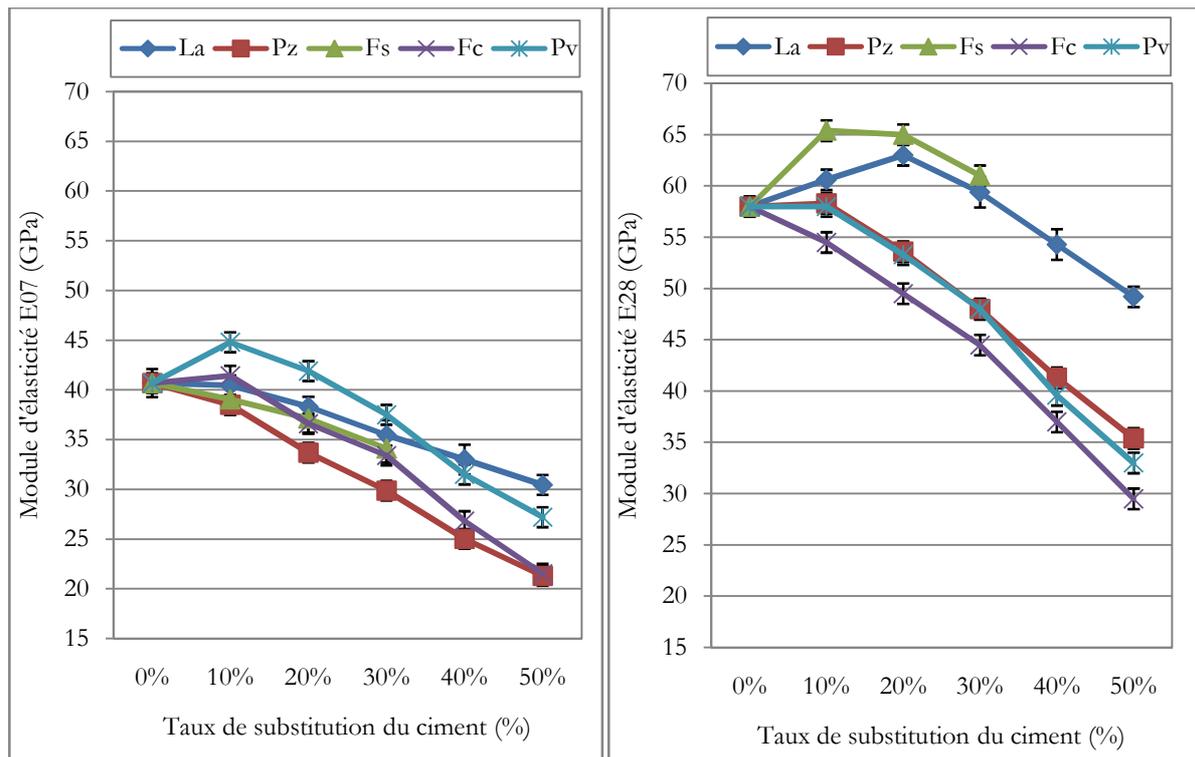
Nous remarquons que les performances mécaniques à 7 et à 28 jours des mortiers avec adjuvants et additions minérales varient sensiblement avec la nature minéralogique et la quantité d'additions incorporée dans le mélange, à 7 jours. Les performances mécaniques des mortiers avec les fillers calcaires (Fc) et les mortiers avec la poudre de verre (Pv) et un superplastifiant, croissent pour les faibles taux de substitution du ciment et atteignent un maximum au voisinage de 10 %, puis commencent à décroître proportionnellement aux taux de substitution du ciment. Pour les mortiers avec la pouzzolane naturelle (Pz), les mortiers avec le laitier granulé (La) et les mortiers avec la fumée de silice (Fs), les performances mécaniques diminuent directement sans aucune inflexion favorable enregistrée. Cette décroissance est proportionnelle aux taux de substitution du ciment.



a) Résistances à la traction



b) Résistance en compression



c) Modules d'élasticité

Figure III. 10. Variation des performances mécaniques à 7 jours et à 28 jours des mortiers avec adjuvant en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales.

À 28 jours, les performances mécaniques pour les mortiers avec les fillers calcaires (Fc) et les mortiers avec la poudre de verre (Pv), diminuent directement sans aucune amélioration et descendent au-dessous des performances mécaniques du mortier de référence à partir du taux de 10 % de substitution du ciment. Pour les mortiers avec la pouzzolane naturelle (Pz), les performances mécaniques restent décroissantes, avec un comportement meilleur qu'à 7 jours. Pour les mortiers avec le laitier granulé (La) et les mortiers avec la fumée de silice (Fs), les performances mécaniques augmentent jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment, et restent supérieures aux performances mécaniques du mortier de référence.

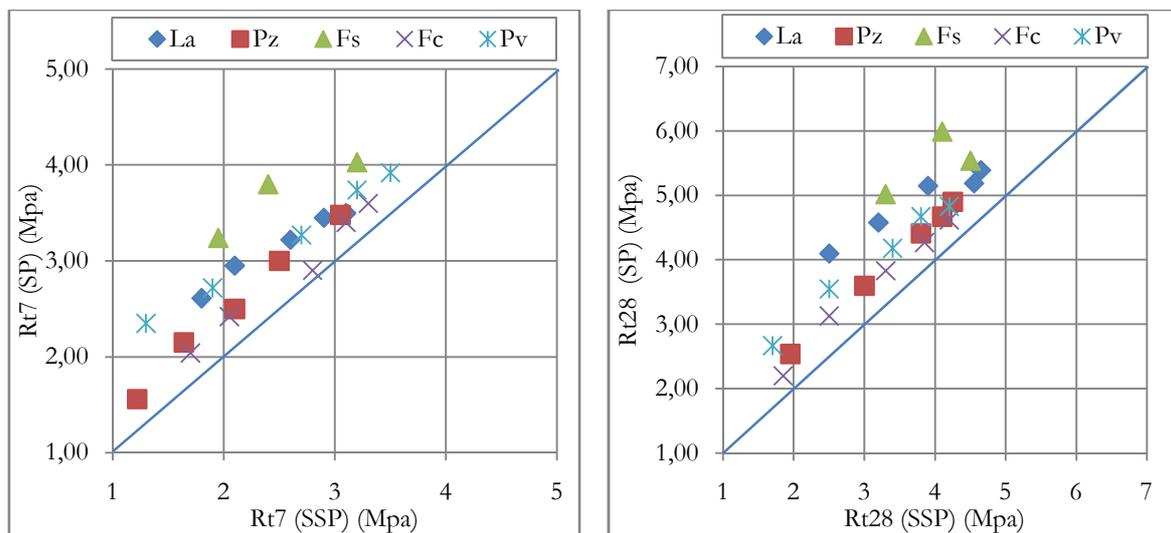
Nous pouvons donc déduire que, de même que pour les mortiers avec additions minérales sans superplastifiant, l'action des fillers calcaires (Fc) et de la poudre de verre (Pv) est limitée principalement à une accélération du processus d'hydratation au jeune âge, à faible taux de substitution du ciment. Les mortiers avec la pouzzolane naturelle (Pz) présentent un meilleur comportement, les performances mécaniques se maintiennent mieux à 28 jours qu'à 7 jours, grâce à l'effet pouzzolanique qui se déclare plus tardivement. La présence du laitier granulé (La) dans les mortiers à faibles taux de substitution du ciment (< 20 %) maintient les performances mécaniques à 7 jours jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment et procure un gain des performances mécaniques intéressant à 28 jours. Le gain des performances mécaniques dans les mortiers avec le laitier granulé (La) est probablement dû aux propriétés hydrauliques latentes du laitier.

L'utilisation du superplastifiant a permis de réduire la quantité d'eau dans les mortiers avec le laitier granulé (La) qu'elle avait un effet défavorable sur l'évolution des performances mécaniques des mortiers sans superplastifiant. L'utilisation combinée de la fumée de silice (Fs) et du superplastifiant dans les mortiers, a permis de limiter la chute des performances mécaniques à 7 jours et procurer des gains à 28 jours. Ce comportement est expliqué par le développement de l'action pouzzolanique de la fumée de silice.

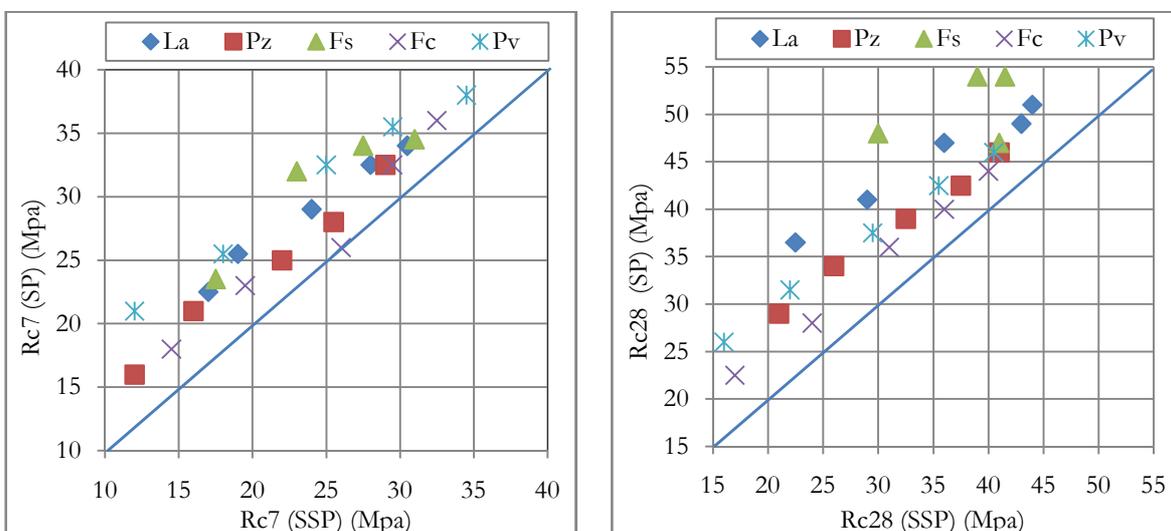
En général, l'amélioration du comportement mécanique des mortiers avec additions minérales et superplastifiant est essentiellement due à la maîtrise de l'effet granulaire défavorable pour certaines additions minérales, d'une part, et à l'amélioration du processus d'hydratation, d'autre part.

III.7. CORRÉLATION ENTRE LES MORTIERS AVEC ADJUVANTS (SP) ET LES MORTIERS SANS ADJUVANTS (SSP)

La corrélation entre les performances mécaniques des mortiers avec superplastifiant (SP) et les mortiers sans superplastifiant (SSP), à 7 et à 28 jours, est représentée par la figure III. 11.



a) Résistance à la traction



b) Résistance en compression.

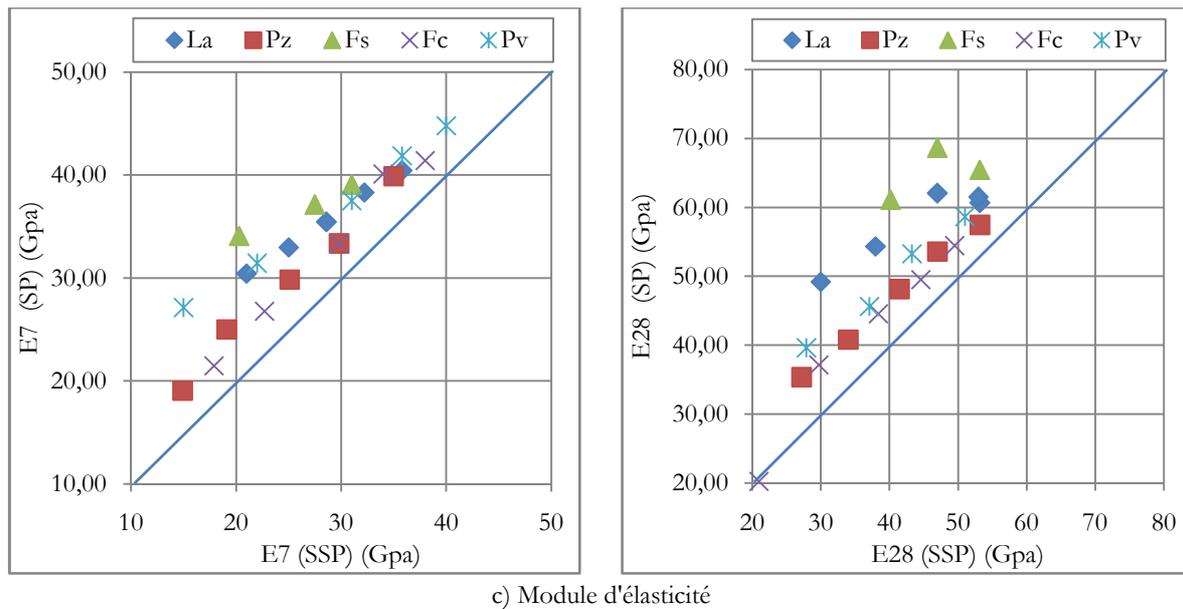


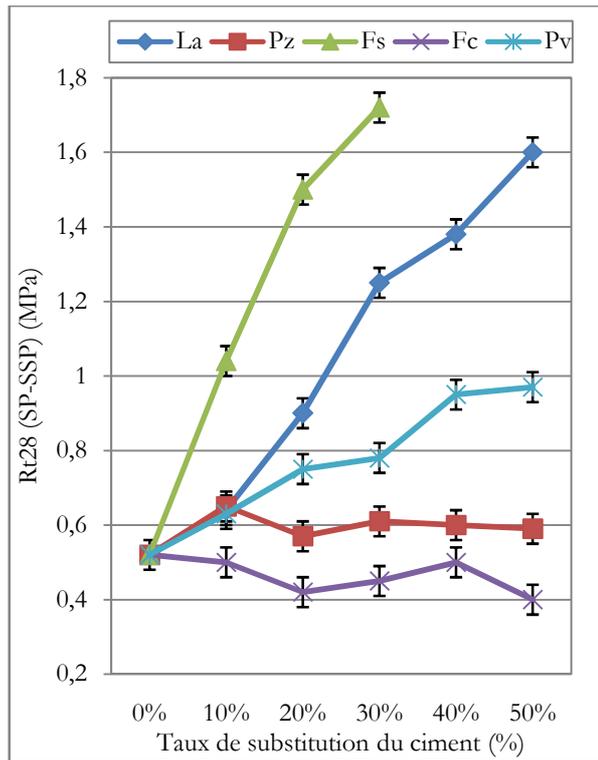
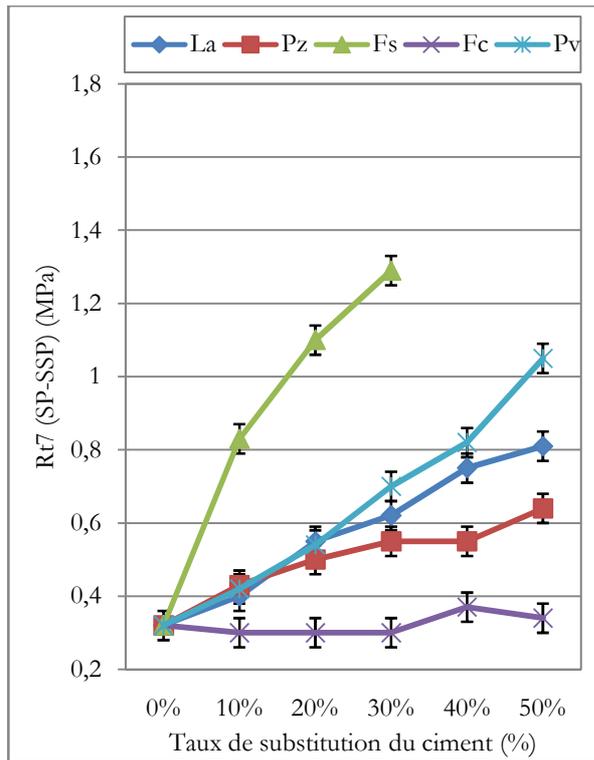
Figure III. 11. Corrélation entre les performances mécaniques à 7 et 28 jours des mortiers avec superplastifiant et des mortiers sans superplastifiant.

Nous remarquons que tous les points expérimentaux des performances mécaniques à 7 et à 28 jours des mortiers avec additions minérales, se placent à gauche de la bissectrice, du côté des mortiers avec superplastifiants. Ceci confirme que les performances mécaniques des mortiers avec superplastifiants sont plus importantes que les performances mécaniques des mortiers sans superplastifiants, soit à 7 ou à 28 jours.

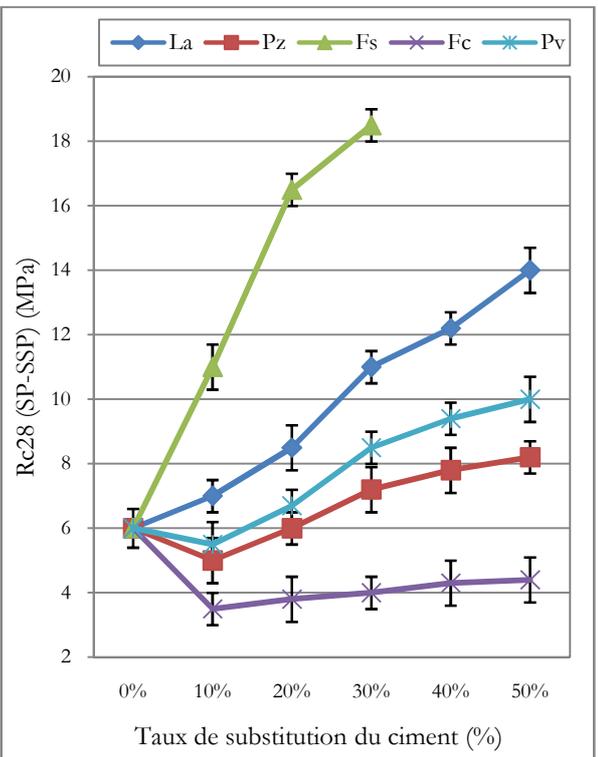
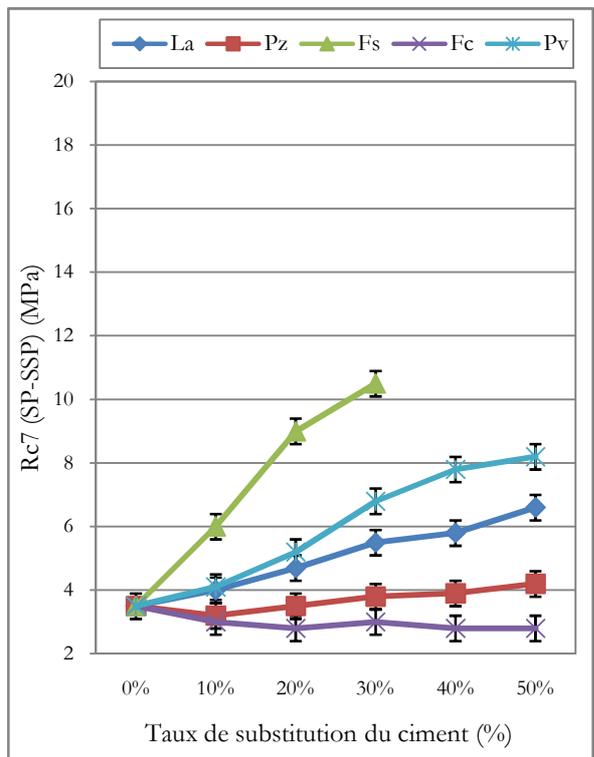
Les points expérimentaux qui s'écartent le plus de la bissectrice sont les points des mortiers avec les additions minérales suivantes : la fumée de silice (Fs), le laitier granulé (La) et la poudre de verre (Pv), qui sont caractérisés par des propriétés pouzzolaniques et des propriétés hydrauliques latentes. Ces mortiers sont caractérisés par des besoins en eau importants dans le cas des mortiers sans superplastifiants, dont l'effet granulaire défavorable sur les performances mécaniques a été compensé par l'utilisation du superplastifiant. Plus les points expérimentaux s'écartent de la bissectrice plus l'effet du superplastifiant est grand.

L'utilisation du superplastifiant a permis le maintien de la consistance de référence et en même temps l'amélioration de l'hydratation du ciment par une meilleure répartition des particules, entraînant un gain de performance mécanique complémentaire par rapport aux mortiers avec additions minérales sans superplastifiant.

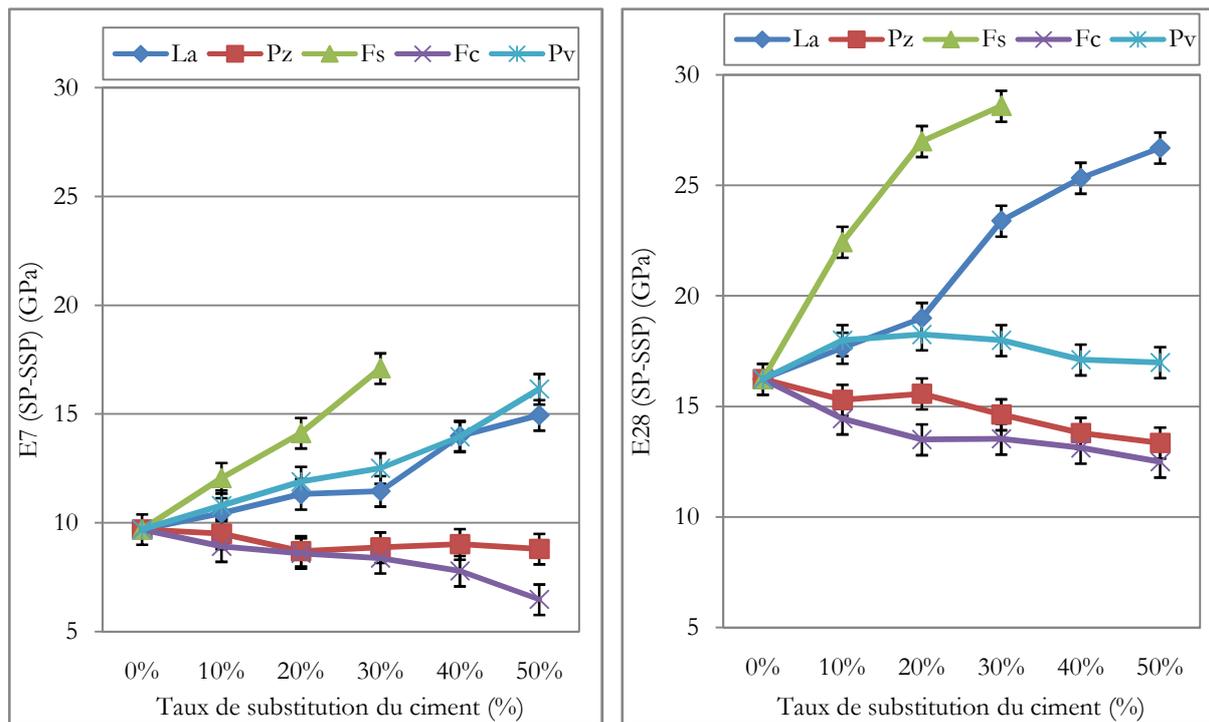
Les variations des performances mécaniques à 7 et à 28 jours entre les mortiers avec superplastifiant et les mortiers sans superplastifiant peuvent être évalués en analysant les écarts des performances mécaniques, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales, représentés par la figure III. 12.



a) Résistance à la traction



b) Résistance en compression.



c) Module d'élasticité

Figure III. 12. Ecarts des performances mécaniques à 7 et à 28 jours des mortiers avec et sans superplastifiant, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions.

Nous remarquons que les écarts entre les performances mécaniques des mortiers avec et sans superplastifiant, à 7 et à 28 jours, dépendent de la nature et de la quantité de l'addition minérale incorporée. A 7 jours, les écarts entre les performances mécaniques, des mortiers avec les fillers calcaires (Fc) et les mortiers avec la pouzzolane naturelle (Pz), avec et sans superplastifiants, décroissent pour les faibles taux de substitution du ciment, puis ils augmentent avec une vitesse faible, en étant peu influencés par la quantité de l'addition minérale dans le mélange, et ils restent inférieurs à l'écart des performances mécaniques du mortier de référence sans additions minérales. Les écarts entre les performances mécaniques, des mortiers avec la fumée de silice (Fs), les mortiers avec la poudre de verre (Pv) et les mortiers avec le laitier granulé (La), croissent proportionnellement avec le taux de substitution du ciment.

A 28 jours, les écarts entre les performances mécaniques, des mortiers avec le filler calcaire (Fc) présentent le même comportement qu'à 7 jours, ils décroissent directement, puis ils croissent avec une vitesse faible, en étant peu influencés par la quantité de l'addition minérale dans le mélange, et ils restent inférieurs à l'écart des performances mécaniques du mortier de référence sans additions minérales. Les écarts entre les performances mécaniques, des mortiers avec la poudre de verre (Pv) et les mortiers avec la pouzzolane naturelle (Pz), décroissent pour les faibles taux de substitution du ciment (10 %), puis ils croissent proportionnellement avec le taux de substitution du ciment. Les écarts entre les performances mécaniques, des mortiers avec la fumée de silice (Fs) et les mortiers avec le laitier granulé (La), présentent le même comportement qu'à 7 jours, ils croissent proportionnellement avec le taux de substitution du ciment, en étant toujours maximale pour les mortiers avec fumée de silice. Ce comportement caractérise les mortiers avec additions qui affichent des besoins en eau importants dans les mortiers avec additions minérales

sans superplastifiants, réduisant ainsi, l'évolution des performances mécaniques de ces mortiers. L'introduction de l'adjuvant superplastifiant a permis de réduire des quantités importantes d'eau permettant ainsi, des gains des performances.

Nous pouvons donc déduire que les mortiers avec additions minérales et superplastifiant affichent toujours des performances mécaniques à 7 et 28 jours plus importantes que les mortiers avec additions minérales sans superplastifiants. Le gain de performances affiché par les mortiers avec additions minérales et superplastifiants peut être expliqué d'une part par la réduction du besoin en eau dans les mortiers avec additions minérales et superplastifiant et d'autre part, par l'amélioration du processus d'hydratation du ciment résultant d'une meilleure répartition des particules du ciment et des additions minérales par le superplastifiant haut réducteur d'eau. La proportion du gain des performances mécaniques des mortiers avec additions minérales et superplastifiants par rapport au mortier de référence sans additions minérales dépend aussi de l'activité de l'addition elle-même. Ceci est visible essentiellement pour la fumée de silice (Fs) et le laitier granulé (La) classés comme additions du type II, selon la norme européenne EN 206-1.

III.8. CONCLUSION

En mesurant les effets des additions minérales sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers, nous avons conclu que :

- l'incorporation des additions minérales dans des pâtes de liants engendre : une variation de la consistance normale et une augmentation du temps de prise, très influencée par la nature et la quantité de l'addition minérale incorporée. La fumée de silice est l'addition qui influe plus sur ces caractéristiques.
- l'incorporation des additions minérales dans des mortiers sans adjuvants engendre des variations de la maniabilité, du besoin en eau et de la compacité à l'état frais, elle engendre aussi des variations des performances mécaniques, à 7 et à 28 jours, à l'état durci. Elles varient sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires et la quantité d'addition incorporée dans le mélange, l'effet du filler calcaire et de la poudre de verre est limitée à une accélération du processus d'hydratation au jeune âge, l'effet de la pouzzolane naturelle, du laitier granulé et de la fumée de silice est maintenu mieux à 28 jours qu'à 7 jours, grâce à la réaction pouzzolanique latente, quoique l'effet de la fumée de silice se trouve atténué par les besoins en eau importants nécessaires pour le maintien de la consistance de référence.
- l'utilisation combinée des additions minérales et adjuvants superplastifiants engendre : une variation du besoin en adjuvant nécessaire pour conférer aux mortiers avec additions minérales la consistance de référence à l'état frais, et une variation des performances mécaniques à 7 et à 28 jours à l'état durci, sensible avec la nature minéralogique. Les caractéristiques granulaires et le taux de substitution du ciment par l'addition incorporée, ces performances mécaniques sont plus importantes que ceux des mortiers avec additions minérales sans superplastifiants. Ce gain des performances mécaniques peut être expliqué d'une part par la réduction du besoin en eau dans les mortiers avec additions minérales et superplastifiant et d'autre part, par l'amélioration du processus d'hydratation du ciment résultant d'une meilleure répartition des particules du ciment et des additions minérales par le superplastifiant haut réducteur d'eau.

CHAPITRE IV
EFFET DES ADDITIONS
SUR LES BETONS

CHAPITRE IV

Effets Des Additions Minérales Sur Les Bétons

IV.1	INTRODUCTION	74
IV.2	FORMULATION DES BETONS	74
IV.3	MISE EN ŒUVRE DES BETONS AVEC ADDITION	74
IV.4	EFFET DES ADDITIONS SUR LES PROPRIETES DE BETON FRAIS	76
IV.4.1	Effet des additions sur l'ouvrabilité des bétons	76
IV.4.2	Effet des additions sur le besoin en adjuvant des bétons.....	77
IV.4.3	Effet des additions sur la compacité des bétons.....	78
IV.5	EFFET DES ADDITIONS SUR LES PERFORMANCES MECANQUES DES BETONS	79
IV.5.1	Effets des additions sur la résistance à la traction par flexion des bétons.....	79
IV.5.2	Effets des additions sur la résistances en compression des bétons	81
IV.5.3	Corrélation entre la résistance à la traction et la résistance en compression.....	82
IV.5.4	Effet des additions sur la vitesse du son des bétons.....	84
IV.6	CONCLUSION	87

Chapitre IV

Effets des Additions Minérales sur les Bétons

IV.1. INTRODUCTION

Le chapitre précédent a montré que l'utilisation des additions minérales dans les mortiers normalisés peut engendrer certaines modifications sur les comportements physico-mécaniques du matériau cimentaire à l'état frais et durci. Ces modifications dépendent de la quantité et les caractéristiques granulaires de l'addition minérale.

Dans ce chapitre, le principal objectif est de valider les conclusions émises pour les mortiers avec additions minérales sur des bétons. Dans ce but, nous avons utilisé la même méthodologie expérimentale appliquée aux mortiers en procédant à la substitution volumique progressive du ciment par les additions minérales dont le volume absolu de l'ensemble des constituants solides et l'ouvrabilité des bétons sont préservés constants.

L'étude des mortiers avec additions minérales (chapitres III), a montré que la substitution de ciment par des taux supérieures à 30 % des additions minérales, n'améliore pas les performances mécaniques des mortiers, donc, nous nous sommes limités à ce taux. Dans ce chapitre, l'application des additions minérales dans les bétons sera limitée aux additions suivantes : le laitier granulé (La), la pouzzolane naturelle (Pz), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv). Nous avons montré aussi, que l'utilisation combinée des additions minérales et d'un superplastifiant dans les mortiers pouvait avoir un apport positif sur les performances mécaniques, pour toutes les additions minérales.

IV.2. FORMULATION DES BETONS

L'étude de la composition d'un béton, consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose que le dosage en ciment et en eau. Afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de partie d'ouvrage en cause, nous appliquons pour calculer les compositions des bétons la méthode de Dreux-Gorisse.

IV.3. MISE EN ŒUVRE DES BETONS AVEC ADDITION

Les additions minérales sont incorporées dans les bétons en substitution des volumes progressifs de ciment, les additions étudiées sont : le laitier granulé (La), la pouzzolane naturelle (Pz), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv), les taux de substitution sont : 10 %, 20 % et 30 %. Deux types de granulats sont utilisés, le premier est un granulat concassé de nature calcaire (GCC), le deuxième est un granulat de verre recyclé (GVR), l'appellation des différents mélanges de bétons est présenté par le tableau IV. 1.

Tableau IV. 1. Appellation des différents mélanges de bétons

N°	Granulat		Additions minérales				%				Appellations
	GCC	GVR	La	Pz	Fc	Pv	0	10	20	30	
01	x						x				C. 0 %
02		x					x				V. 0 %
03	x		x					x			C. La.10 %
04	x		x						x		C. La.20 %
05	x		x							x	C. La.30 %
06		x	x					x			V. La.10 %
07		x	x						x		V. La.20 %
08		x	x							x	V. La.30 %
09	x			x				x			C. Pz.10 %
10	x			x					x		C. Pz.20 %
11	x			x						x	C. Pz.30 %
12		x		x				x			V. Pz.10 %
13		x		x					x		V. Pz.20 %
14		x		x						x	V. Pz.30 %
15	x				x			x			C. Fc.10 %
16	x				x				x		C. Fc.20 %
17	x				x					x	C. Fc.30 %
18		x			x			x			V. Fc.10 %
19		x			x				x		V. Fc.20 %
20		x			x					x	V. Fc.30 %
21	x					x		x			C. Pv.10 %
22	x					x			x		C. Pv.20 %
23	x					x				x	C. Pv.30 %
24		x				x		x			V. Pv.10 %
25		x				x			x		V. Pv.20 %
26		x				x				x	V. Pv.30 %

Nous avons visé une consistance plastique, elle a été choisie égale à un affaissement au cône d'Abrams de 7 cm, pour cela, et compte tenu de la dimension maximum des granulats et du caractère concassé des graviers, nous avons adopté un dosage en eau déminéralisé de 204 l/m³, pour tous les mélanges. Nous avons ajusté la consistance avec un superplastifiant, le tableau IV. 2 reporte les formulations des différents mélanges de bétons.

Tableau IV. 2. Formulations des différents mélanges de bétons

a) Composition de 1 m³ de béton GCC :

Béton	Ciment (kg)	Eau (ℓ)	E/C	Super Plastifiant (g)	Additions minérales (g)				Sable (kg)	Gravier (kg)	Slump (cm)
					La	Pz	Fc	Pv			
C. 0 %	400	204	0.5	1.20	0	0	0	0	711.32	1079.14	7
C. La 10 %	360	204	0.5	1.10	435.50	0	0	0	711.32	1079.14	7
C. La 20 %	320	204	0.5	1.50	870.30	0	0	0	711.32	1079.14	7
C. La 30 %	280	204	0.5	2.00	1320.3	0	0	0	711.32	1079.14	7
C. Pz 10 %	360	204	0.5	0.82	0	340.50	0	0	711.32	1079.14	7
C. Pz 20 %	320	204	0.5	0.90	0	785.90	0	0	711.32	1079.14	7
C. Pz 30 %	280	204	0.5	1.30	0	1205.0	0	0	711.32	1079.14	7
C. Fc 10 %	360	204	0.5	0.98	0	0	380.00	0	711.32	1079.14	7
C. Fc 20 %	320	204	0.5	1.30	0	0	705.00	0	711.32	1079.14	7
C. Fc 30 %	280	204	0.5	1.70	0	0	1020.0	0	711.32	1079.14	7
C. Pv 10 %	360	204	0.5	1.01	0	0	0	345.20	711.32	1079.14	7
C. Pv 20 %	320	204	0.5	1.30	0	0	0	560.00	711.32	1079.14	7
C. Pv 30 %	280	204	0.5	1.80	0	0	0	1150.2	711.32	1079.14	7

b) Composition de 1 m³ de béton GVR :

Béton	Ciment (kg)	Eau (l)	E/C	Supper Plastifiant (g)	Additions minérales (g)				Sable (kg)	Gravier (kg)	Slump (cm)
					La	Pz	Fc	Pv			
V. 0 %	400	204	0.5	0.90	0	0	0	0	724.36	1098.92	7
V. La 10 %	360	204	0.5	0.70	435.50	0	0	0	724.36	1098.92	7
V. La 20 %	320	204	0.5	1.00	870.30	0	0	0	724.36	1098.92	7
V. La 30 %	280	204	0.5	1.40	1320.3	0	0	0	724.36	1098.92	7
V. Pz 10 %	360	204	0.5	0.40	0	340.50	0	0	724.36	1098.92	7
V. Pz 20 %	320	204	0.5	0.50	0	785.90	0	0	724.36	1098.92	7
V. Pz 30 %	280	204	0.5	0.90	0	1205.0	0	0	724.36	1098.92	7
V. Fc 10 %	360	204	0.5	0.60	0	0	380.00	0	724.36	1098.92	7
V. Fc 20 %	320	204	0.5	0.90	0	0	705.00	0	724.36	1098.92	7
V. Fc 30 %	280	204	0.5	1.20	0	0	1020.0	0	724.36	1098.92	7
V. Pv 10 %	360	204	0.5	0.70	0	0	0	345.20	724.36	1098.92	7
V. Pv 20 %	320	204	0.5	0.90	0	0	0	560.00	724.36	1098.92	7
V. Pv 30 %	280	204	0.5	1.20	0	0	0	1150.2	724.36	1098.92	7

IV.4. EFFET DES ADDITIONS SUR LES PROPRIETES DE BETON FRAIS

Pour étudier l'effet des additions minérales sur les propriétés des bétons frais, nous avons mesuré les paramètres qui caractérisent les bétons frais et nous nous sommes particulièrement intéressés aux propriétés suivantes :

- l'ouvrabilité des bétons frais sans adjuvants,
- le besoin en adjuvant des bétons frais à même ouvrabilité,
- la compacité des bétons frais à même ouvrabilité.

IV.4.1. Effet des additions sur l'ouvrabilité des bétons

Pour étudier l'effet des additions minérales sur l'ouvrabilité des bétons frais. Nous avons fabriqué des bétons avec une quantité constante d'eau déminéralisée de 204 l/m³ sans l'utilisation de l'adjuvant, et nous avons mesuré leur affaissement, conformément à la norme NF P 18 - 451. La variation de l'affaissement des bétons, est représentée en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales pour les deux types de granulats GCC et GVR, à la figure IV.1.

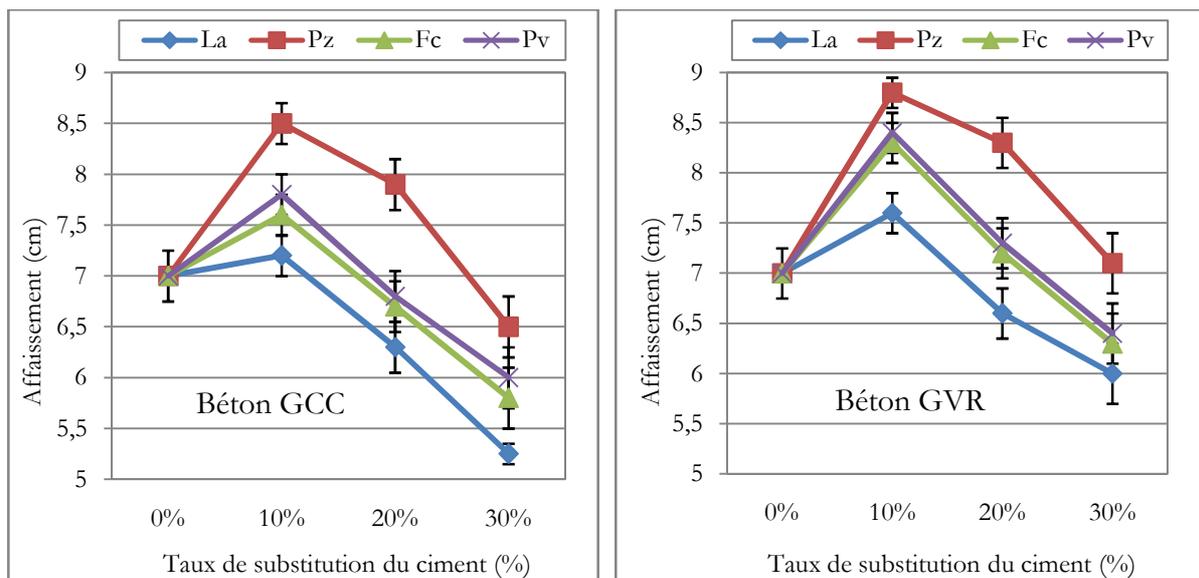


Figure IV. 1. Variation de l'affaissement au cône d'Abrams des bétons GCC et GVR, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales.

Nous constatons sur la figure IV. 1, que l'affaissement au cône d'Abrams des bétons GCC est similaire à celui des bétons GVR. L'ouvrabilité des bétons GCC et GVR avec les additions minérales, dépend de la nature et de la quantité de l'addition incorporée dans le mélange. Nous pouvons remarquer aussi, que l'affaissement du béton frais avec les additions minérales augmente jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment par l'addition, puis décroît avec l'augmentation de la quantité d'additions dans le mélange pour les deux granulats utilisés. Ceci suggère, que l'incorporation de ces additions dans les bétons GCC et GVR à faibles taux de substitution, améliore la plasticité des bétons, puis elle devient plus ferme à plus forts taux de substitution du ciment.

L'ouvrabilité des bétons avec la pouzzolane naturelle (Pz), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv) est similaire à celle des mortiers avec ces mêmes additions, mais l'ouvrabilité des bétons, à faibles taux de substitution du ciment avec le laitier granulé (La), diffère de celle des mortiers avec le laitier granulé. En effet, la substitution du ciment par le laitier granulé dans les mortiers, engendre une réduction de l'ouvrabilité pour tous les taux de substitution du ciment, ce qui suggère que la présence d'une faible quantité du laitier granulé avec les graviers de formes angulaires améliore l'arrangement spatial des bétons.

IV.4.2. Effet des additions sur le besoin en adjuvant des bétons

Pour étudier l'effet des additions minérales sur le besoin en adjuvants des bétons, nous avons utilisé une quantité d'eau constante ce qui a nécessité l'ajout d'une certaine quantité de superplastifiant nécessaire pour assurer l'ouvrabilité de référence qui a été choisie égale à un affaissement de 7 ± 0.5 cm au cône d'Abrams. Le choix de la quantité d'eau dans les différentes formulations de béton a été fixé à 204 l/m^3 .

Le besoin en adjuvant est exprimé en taux massique par rapport à la quantité de liant (A/L en %), et il est représenté pour les bétons GCC-SP et GVR-SP, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales, par la figure IV. 2.

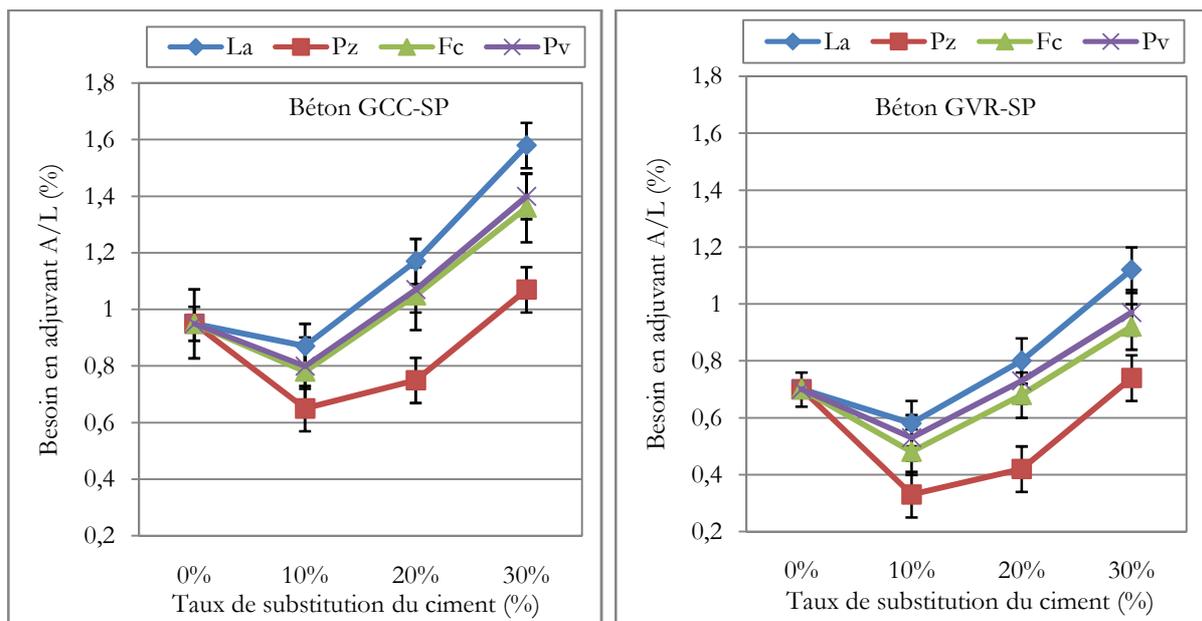


Figure IV. 2. Variation du besoin en adjuvant des bétons GCC-SP et GVR-SP avec additions à même ouvrabilité en fonction du taux de substitution du ciment

Nous remarquons sur la figure VI. 2, que le besoin en adjuvant des bétons GCC-SP est plus important que celui du béton GVR-SP. Nous pouvons aussi remarquer que le besoin en adjuvant des deux bétons varie de la même manière. Le besoin en adjuvant des bétons varie sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires et la quantité d'additions minérales incorporée dans le mélange.

Pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 10 %, Les bétons avec les additions minérales présentent un besoin en adjuvant plus faible que celui des bétons de référence, pour les deux granulats utilisés. Ce comportement confirme l'optimisation du squelette granulaire de ces bétons, les particules des additions remplissent la porosité inter-granulaire et libèrent l'eau remplissant habituellement ces pores. Ainsi, la quantité de l'adjuvant, nécessaire à la lubrification des particules pour donner au mélange l'ouvrabilité de référence, se trouve réduite.

A plus forts taux de substitutions du ciment par ces additions, le besoin en adjuvant croît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange, mais diffère d'une addition à une autre. Pour la pouzzolane naturelle (Pz), le besoin en adjuvant reste pratiquement inférieur à celui du béton de référence, avec un léger dépassement à 30 % du taux de substitution du ciment, pour le béton GCC-SP. Pour le laitier granulé (La), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv) le besoin en adjuvant croît avec l'augmentation du taux de substitution du ciment, à partir de 10 % du taux de substitution du ciment indépendamment de la nature du granulat utilisé. Il en résulte donc que l'optimisation de l'arrangement spatial des particules d'additions minérales tend à disparaître à plus forts taux de substitution du ciment plus visiblement pour le laitier granulé.

IV.4.3. Effet des additions sur la compacité des bétons

Pour étudier l'effet des additions minérales sur la compacité des bétons, nous avons mesuré les masses volumiques apparentes des bétons à l'état frais, pour calculer leur compacité. La variation de la compacité des bétons GCC-SP et GVR-SP à une ouvrabilité constante en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales, est exprimée en pourcentage (%) et elle est représenté par la figure IV. 3.

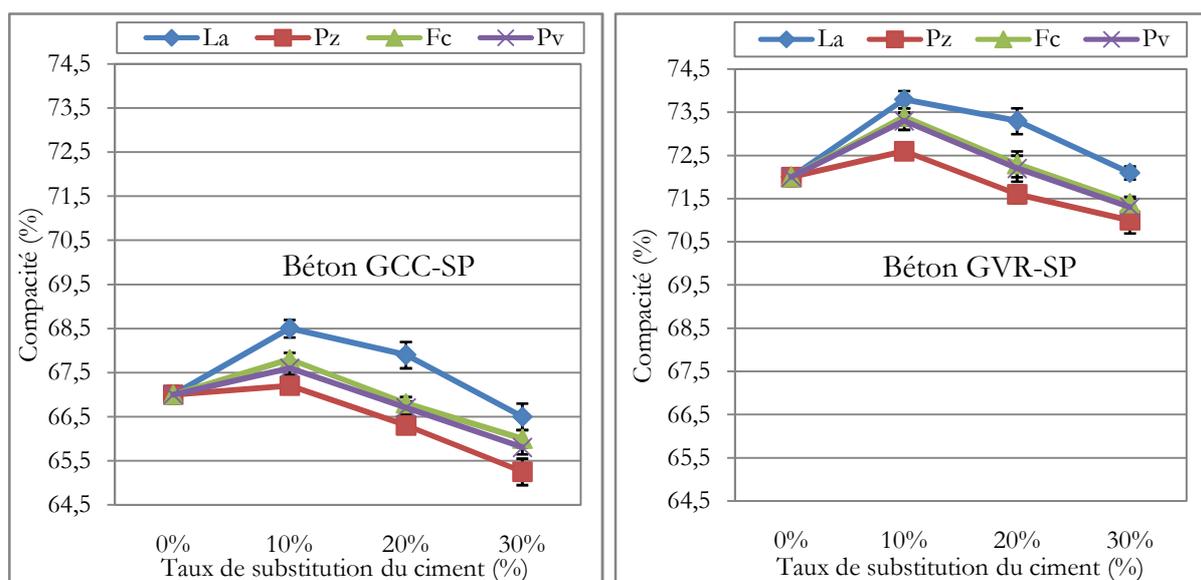


Figure IV. 3. Variation de la compacité des bétons GCC-SP et GVR-SP à une ouvrabilité constante en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales

Nous pouvons constater sur la figure IV. 3 que, la compacité des bétons GVR-SP est plus importante que celle du béton GCC-SP. Nous pouvons aussi remarquer que la compacité des deux bétons varie de la même manière. La compacité des bétons avec additions minérales varie sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (morphologie) et la quantité de l'addition incorporée dans le mélange.

Pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 10 %, Les bétons avec les additions minérales présentent une compacité plus élevée que celle des bétons de référence, pour les deux granulats utilisés. Ceci est due à une optimisation du squelette granulaire de ces bétons, les particules des additions remplissent la porosité inter-granulaire et libère l'eau remplissant habituellement ces pores. Ainsi, la quantité d'eau, nécessaire à la lubrification des particules pour donner au mélange l'ouvrabilité de référence, se trouve réduite.

A plus forts taux de substitution du ciment par les additions, La compacité décroît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange, mais diffère d'une addition à une autre. Pour la pouzzolane naturelle (Pz), la compacité est inférieure à celle du béton de référence, pour les deux bétons. Pour les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv), la compacité décroît avec l'augmentation du taux de substitution du ciment, et elle est inférieure à celle du béton de référence à 30 % du taux de substitution du ciment. La compacité des bétons frais avec le laitier granulé (La) est la plus importante, elle décroît avec l'augmentation du taux de substitution du ciment, et elle est supérieur à celle du béton de référence

Ce comportement a été expliqué dans le chapitre précédent pour les mortiers. Néanmoins, une différence est signalée pour le laitier granulé (La) et les fillers calcaires (Fc), à faibles taux de substitution. Ce comportement est probablement dû à la présence des graviers, dont la porosité se trouve remplie par des additions, ce comportement est peu influencé par la nature du granulat.

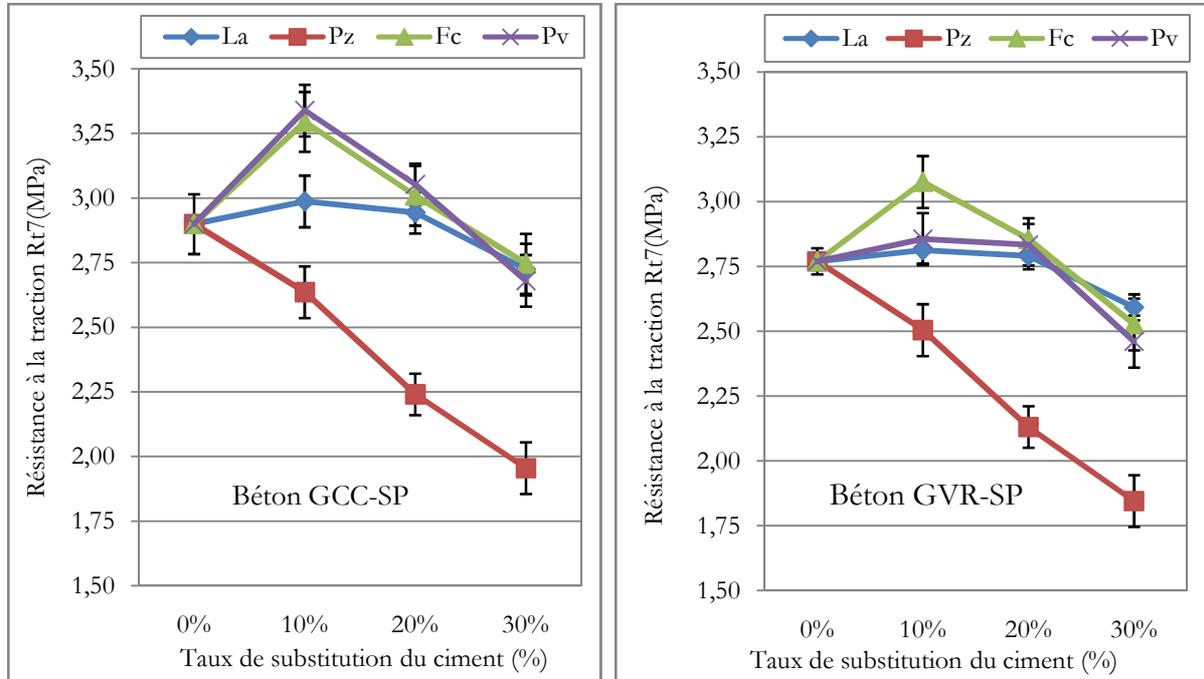
IV.5. EFFET DES ADDITIONS SUR LES PERFORMANCES MECANIQUES DES BETONS

IV.5.1. Effets des additions sur la résistance à la traction par flexion des bétons

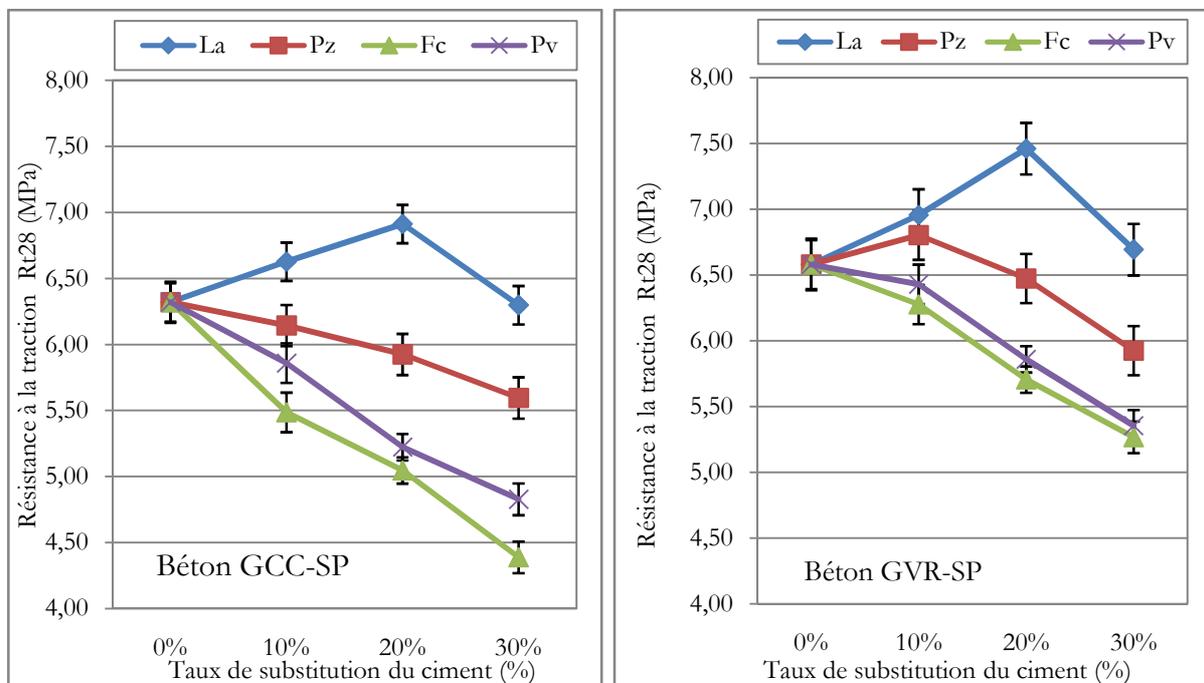
Les variations des résistances à la traction par flexion à 7 et à 28 jours des bétons GCC-SP et GVR-SP sont représentées en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales à la figure IV. 4. Nous remarquons que le béton GVR-SP sans additions présente une résistance à la traction par flexion à 7 jours plus faible que celle du béton GCC-SP sans additions, par contre, sa résistance à la traction à 28 jours est plus supérieure. Nous pouvons remarquer aussi, que les résistances à la traction par flexion à 7 et à 28 jours des bétons avec additions minérales et superplastifiant (SP) varient sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires et la quantité d'additions minérale incorporée.

A 7 jours les résistances à la traction par flexion des deux bétons GCC-SP et GVR-SP avec le laitier granulé (La), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv), croissent pour 10 % du taux de substitution du ciment, puis commencent à décroître proportionnellement aux taux de substitution du ciment. Pour la pouzzolane naturelle (Pz), les résistances à la traction par flexion diminuent directement sans aucune inflexion favorable.

A 28 jours, les résistances à la traction par flexion des bétons GCC-SP avec la pouzzolane naturelle (Pz), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv), diminuent directement sans aucune amélioration, cette décroissance étant plus accentuées pour les bétons avec les fillers calcaires (Fc), les résistances à la traction des bétons GCC-SP avec le laitier granulé (La), croissent jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment, puis commencent à décroître.



a) Résistance à la traction par flexion des bétons à 7 jours.



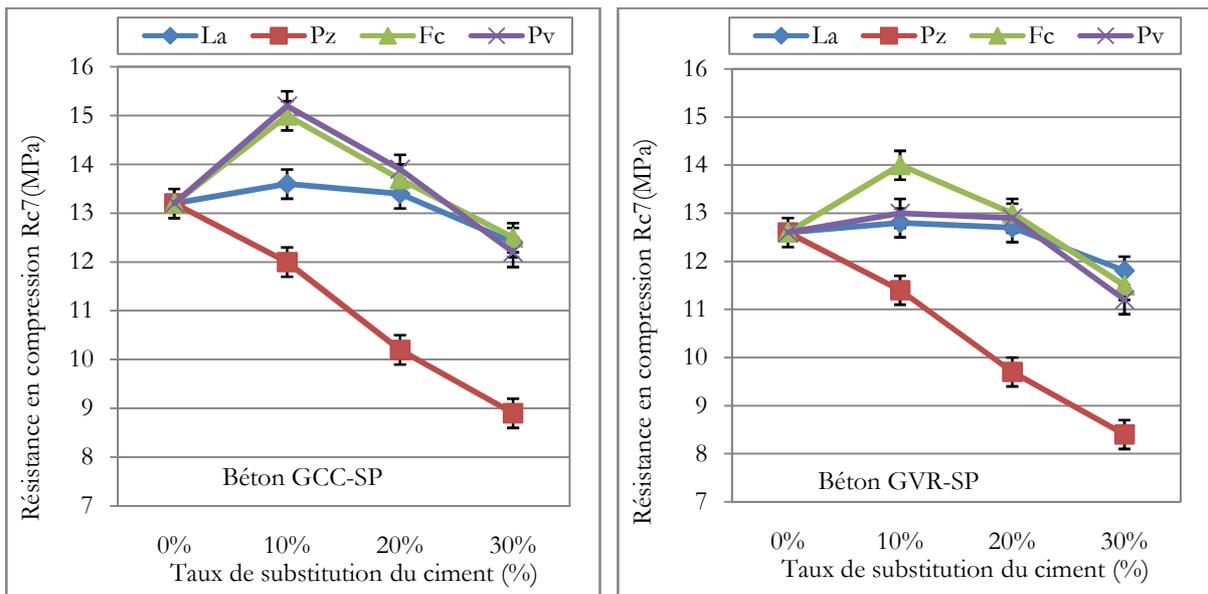
b) Résistance à la traction par flexion des bétons à 28 jours.

Figure IV. 4. Variation de la résistance à la traction par flexion à 7 et à 28 jours des bétons GCC-SP et GVR-SP, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

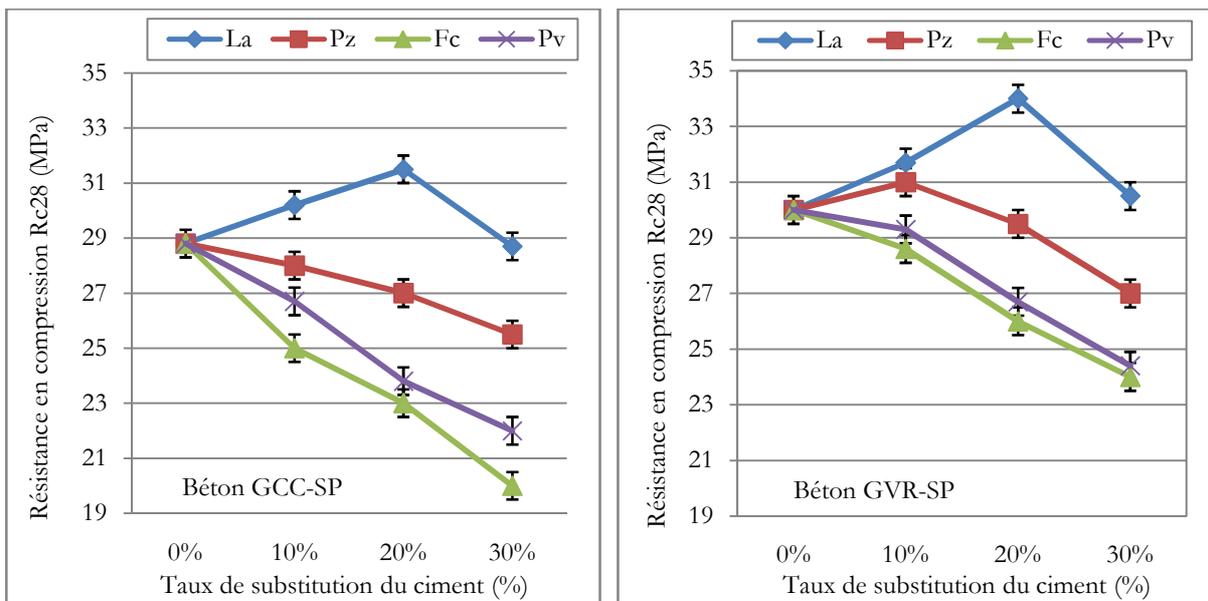
Les résistances à la traction par flexion des bétons GVR-SP avec le laitier granulé (La), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv), sont pratiquement similaire à ceux des bétons GCC-SP, tandis que les résistances à la traction par flexion des bétons GVR-SP avec la pouzzolane naturelle (Pz), croissent jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment, puis commencent à décroître proportionnellement aux taux de substitution du ciment.

IV.5.2. Effets des additions sur la résistances en compression des bétons

Les variations des résistances en compression à 7 et à 28 jours des bétons GCC-SP et GVR-SP sont représentées en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales à la figure IV. 5.



a) Résistance en compression des bétons à 7 jours



b) Résistance en compression des bétons à 28 jours

Figure IV. 5. Variation de la résistance en compression à 7 et à 28 jours des bétons GCC-SP et GVR-SP, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.

Nous remarquons que le béton GVR-SP sans additions présente une résistance en compression à 7 jours plus faible que celle du béton GCC-SP sans additions, par contre, sa résistance en compression à 28 jours est supérieure. Nous pouvons remarquer aussi, que les résistances en compression à 7 et à 28 jours des bétons avec additions minérales et superplastifiant (SP) varient sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires et la quantité d'additions minérale incorporée.

A 7 jours, les résistances en compression pour les deux types de béton GCC-SP et GVR-SP, avec le laitier granulé (La), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv), croissent jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment puis commencent à décroître proportionnellement aux taux de substitution du ciment, les résistances en compression pour les bétons avec la pouzzolane naturelle (Pz), diminuent directement sans aucune inflexion favorable.

A 28 jours, les résistances en compression des bétons GCC-SP avec la pouzzolane naturelle (Pz), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv), diminuent directement sans aucune amélioration, cette décroissance étant plus accentuée pour les bétons avec les fillers calcaires (Fc). Les résistances en compression des bétons GCC-SP avec le laitier granulé (La), croissent jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment, puis décroître jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment.

Les résistances en compression des bétons GVR-SP avec la pouzzolane naturelle (Pz), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv) croissent légèrement jusqu'à 10 % du taux de substitution, puis décroître proportionnellement aux taux de substitution du ciment par l'addition. Les résistances en compression des bétons GVR-SP avec le laitier granulé (La), sont pratiquement similaires à ceux des bétons GCC-SP, ils croissent jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment, puis décroître jusqu'à 30 % du taux de substitution du ciment.

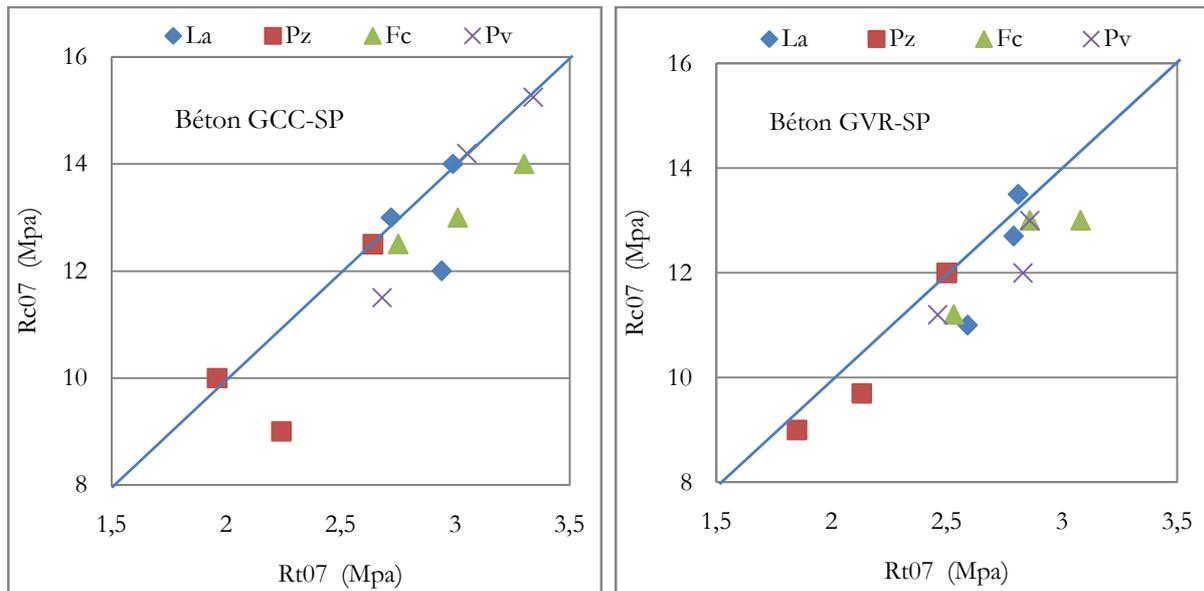
Nous pouvons donc déduire que, l'action des fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv) sur les performances mécaniques est limitée principalement à une accélération du processus d'hydratation aux jeunes âges, à faible taux de substitution du ciment par l'addition. Les performances mécaniques des bétons avec la pouzzolane naturelle (Pz) se maintiennent mieux à 28 jours qu'à 7 jours d'âge, à cause de l'effet pouzzolanique qui se déclare plus tardivement. La présence du laitier granulé (La) dans les bétons à faibles taux de substitution du ciment (< 20 %) maintient les performances mécaniques à 7 jours jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment et procure un gain des performances mécaniques intéressant à 28 jours. Le gain des résistances dans les bétons avec le laitier granulé (La) est probablement dû aux propriétés hydrauliques latentes du laitier.

IV.5.3. Corrélation entre la résistance à la traction et la résistance en compression

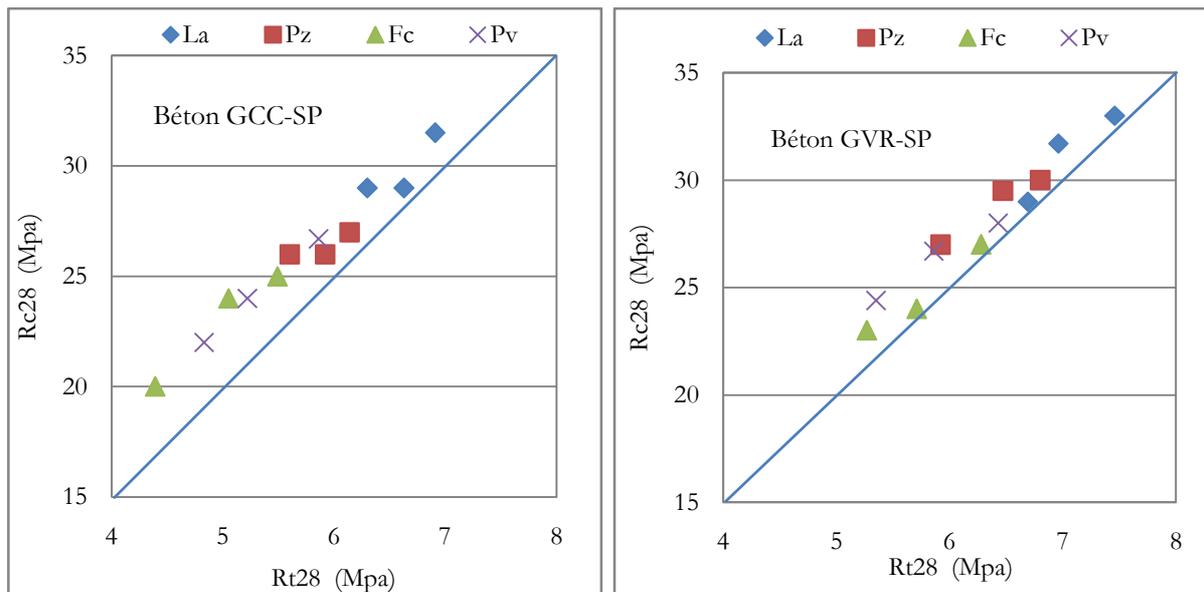
La corrélation entre les résistances à la traction et les résistances en compression des bétons GCC-SP et GVR-SP avec les additions minérales, à 7 et à 28 jours, peut être présentée par la figure IV. 6.

Nous remarquons sur la figure IV. 6 qu'il existe une forte corrélation entre les résistances en compression et les résistances à la traction à 7 jours, les points expérimentaux des résistances pour les deux bétons suivent une droite parallèle à la bissectrice d'équation $R_{C7}=10. R_{T7}$, du côté

de l'axe des résistances à la traction à 7 jours. Ceci suggère, que les résistances à la traction à 7 jours tournent autour du dixième des résistances en compression, en valeur inférieure.



a) Corrélation entre les résistances en compression et les résistances à la traction à 7 jours



b) Corrélation entre les résistances en compression et les résistances à la traction à 28 jours

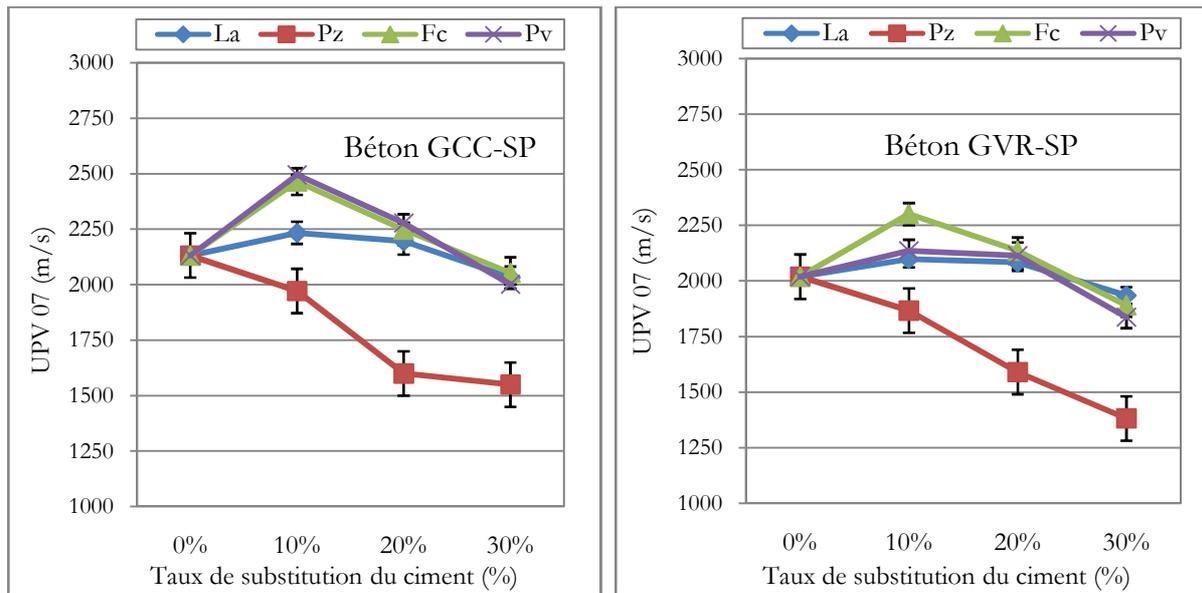
Figure IV. 6. Corrélation entre les résistances en compression et les résistances à la traction à 7 et à 28 jours, des bétons GCC-SP et GVR-SP avec additions minérales

De même, la figure IV. 6, montre qu'il existe une forte corrélation entre les résistances en compression et les résistances à la traction à 28 jours. Tous les points expérimentaux des résistances des bétons avec additions minérales suivent une droite parallèle à la bissectrice d'équation $R_{c28} = 10 \cdot R_{t28}$, du côté de l'axe des résistances en compression à 28 jours. Ceci suggère, que les résistances en compression à 28 jours des bétons avec additions minérales tournent autour du dixième des résistances à la traction, en valeur inférieure.

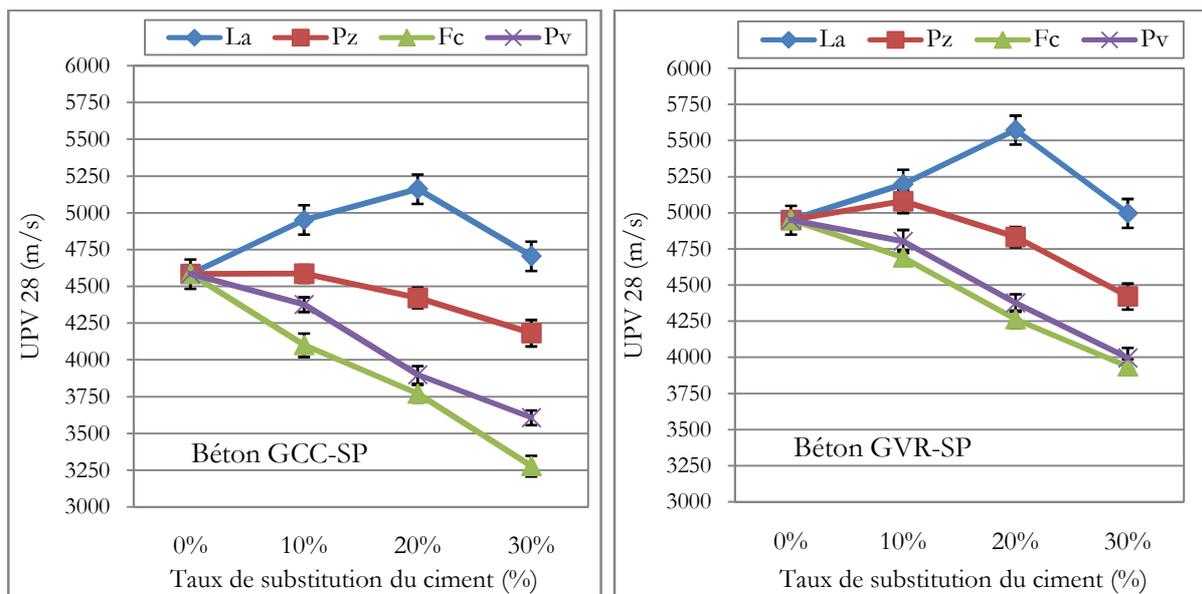
Nous pouvons donc confirmer qu'il existe une très bonne corrélation entre les résistances en compression et les résistances à la traction des bétons avec adjuvant et additions minérales. De ce fait, les phénomènes à l'origine de la variation des résistances à la traction et en compression, à 7 jours et 28 jours, des bétons avec additions minérales, sont les mêmes que ceux qui ont été exposés pour les résistances à la traction et en compression des mortiers.

IV.5.4. Effet des additions sur la vitesse du son des bétons.

Les variations de la vitesse d'impulsion ultrasonique UPV (ultrasonic pulse velocity), à 7 et à 28 jours, des bétons GCC-SP et GVR-SP, sont présentées en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales à la figure IV. 7.



a) Vitesse de propagation des ultrasons UPV à 7 jours



b) Vitesse de propagation des ultrasons UPV à 28 jours

Figure IV. 1. Vitesse de propagation des ultrasons UPV à 7 et à 28 jours, des bétons GCC-SP et GVR-SP avec additions minérales

Nous remarquons que les vitesses de propagation mesurées sur le béton GVR-SP sans additions à 7 jours sont faibles que ceux mesurés sur le béton GCC-SP sans additions, par contre, les ultrasons mesurés à 28 jours sont supérieurs.

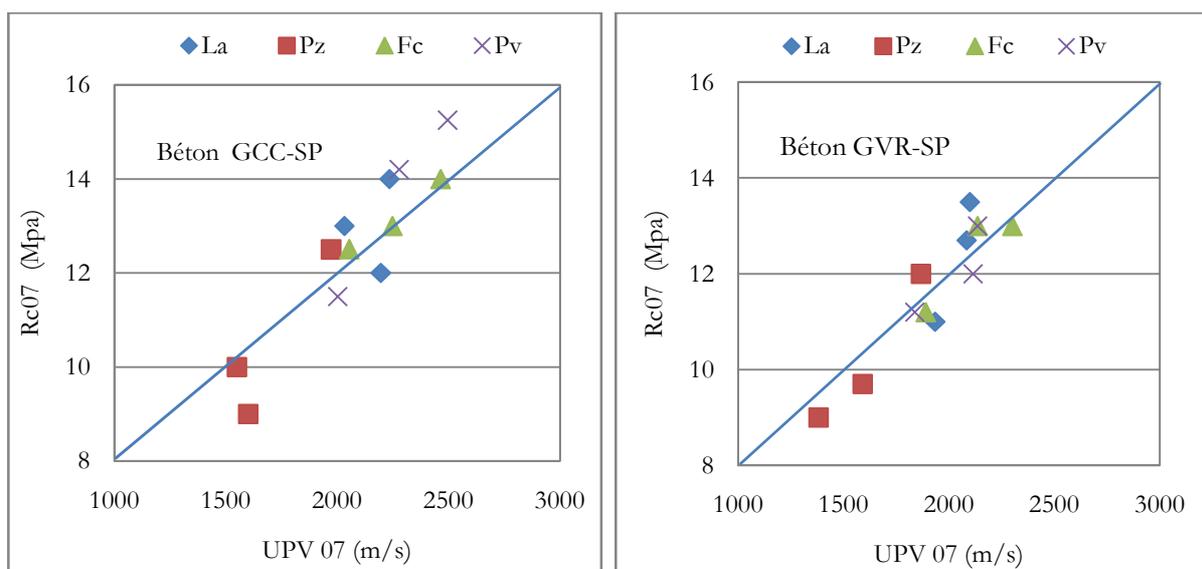
Nous pouvons remarquer aussi, que les vitesses de propagation mesurées à 7 et à 28 jours des bétons avec additions minérales et superplastifiant (SP) varient sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires et la quantité d'additions minérales incorporées.

A 7 jours les ultrasons mesurés sur les deux bétons GCC-SP et GVR-SP avec le laitier granulé (La), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv), croissent pour 10 % du taux de substitution du ciment, puis commencent à décroître proportionnellement aux taux de substitution du ciment. Pour la pouzzolane naturelle (Pz), les vitesses de propagation mesurées diminuent directement sans aucune inflexion favorable.

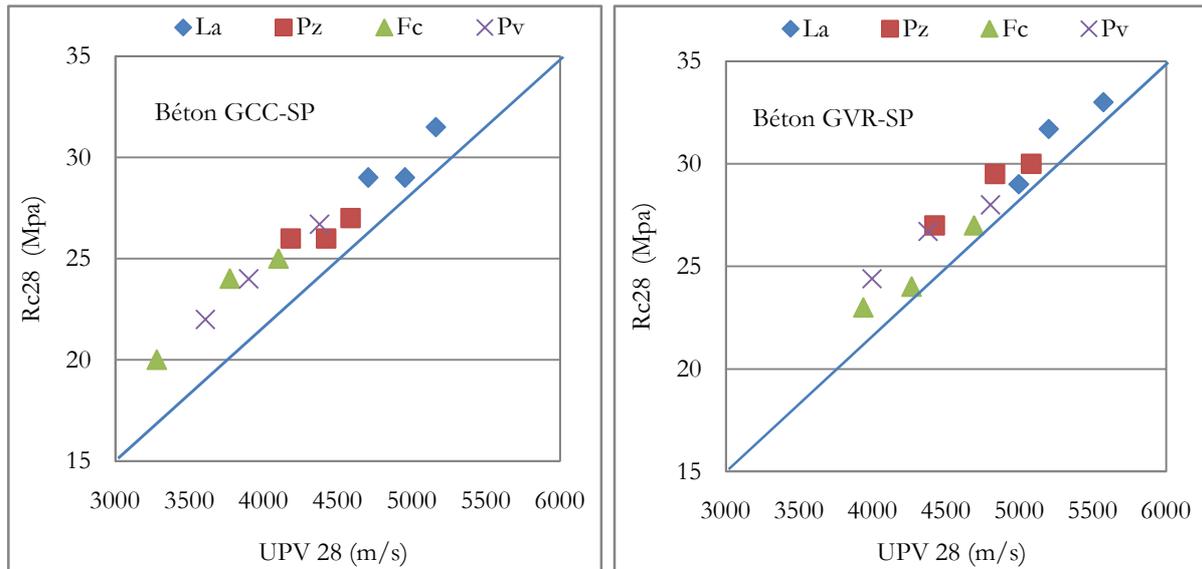
A 28 jours, les vitesses de propagation mesurées des bétons GCC-SP avec la pouzzolane naturelle (Pz), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv), diminuent directement sans aucune amélioration, cette décroissance étant plus accentuées pour les bétons avec les fillers calcaires (Fc), les vitesses de propagation mesurées des bétons GCC-SP avec le laitier granulé (La), croissent jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment, puis commencent à décroître.

Les vitesses de propagation mesurées sur les bétons GVR-SP avec le laitier granulé (La), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv), sont pratiquement similaire à ceux mesurés sur les bétons GCC-SP, tandis que les vitesses de propagation mesurées sur les bétons GVR-SP avec la pouzzolane naturelle (Pz), croissent jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment, puis commencent à décroître proportionnellement aux taux de substitution du ciment par l'addition.

La relation entre la résistance à la compression des bétons GCC-SP et GVR-SP, à 7 et à 28 jours et leur vitesse de propagation des ultrasons UPV (ultrasonique pulse velocity), est représentée par la figure IV. 8.



a) Corrélation entre les résistances en compression et la vitesse de propagation des ultrasons UPV à 7 jours



b) Corrélation entre les résistances en compression et la vitesse de propagation des ultrasons UPV à 28 jours

Figure IV. 2. Corrélation entre les résistances en compression et la vitesse de propagation des ultrasons UPV à 7 et à 28 jours, des bétons GCC-SP et GVR-SP avec additions minérales.

La relation entre la résistance et la vitesse de propagation n'est pas unique d'autant plus qu'elle est affectée par plusieurs facteurs. L'influence de ces facteurs a été étudiée par plusieurs chercheurs Sturup, V.R, Vechio, R.J, et Caratin H. [Sturup et al. 1984], Anderson et Seals [Anderson et Seals. 1981], Kaplan [Kaplan 1959], et tous ont conclu qu'il est vain de tenter d'établir une relation théorique entre la résistance à la compression et la vitesse de propagation sauf condition faite d'établir au préalable des corrélations pour le même type de béton que celui qui est sous investigation. Hannachi [Hannachi, S., 2015] a essayé de trouver pourquoi et comment les méthodes non destructives en occurrence l'UPV peuvent être utilisées afin d'évaluer la résistance à la compression du béton sur site, elle a conclu que l'application sur chantier de telles méthodes non destructives pourra nous renseigner sur la qualité du béton et il sera préférable pour un bon suivi de qualité-contrôle du béton et d'établir des corrélations entre des essais mécaniques sur des éprouvettes coulées et conservées dans les mêmes conditions que le béton de l'ouvrage plutôt que de recourir à des carottages qui sont très difficiles à réaliser, moins représentatifs et plus coûteux.

Bouikni, A., Swamy, R.N., et Bali, A. [Bouikni, A., 2010] a montré que la vitesse de propagation augmente très rapidement que celle de la résistance à la compression. La vitesse de propagation à 7 jours est entre 89 et 98 % de la vitesse à 28 jours, mais pour la même période, le développement de la résistance est de 66 à 83 % de la résistance 28 jours. Il est noté que la vitesse de propagation au-delà de 28 jours est approximativement de 100 %.

IV.6. CONCLUSION

Le principal objectif de ce chapitre était de valider les conclusions émises pour les mortiers avec additions minérales et superplastifiant pour les bétons. Nous avons tiré les conclusions suivantes :

- L'ouvrabilité et la compacité des bétons GCC et GVR avec la poudre de verre (Pv), les fillers calcaires (Fc) et la pouzzolane naturelle (Pz), est presque similaire à celui des mortiers avec ces mêmes additions, mais le comportement des bétons avec le laitier granulé (La) diffère à faibles taux de substitution du ciment de celui des mortiers avec la même addition.

- Les bétons GCC et GVR avec additions minérales présentent un besoin en adjuvants plus faibles que celui des bétons de référence pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 10 %. Ceci indique une optimisation du squelette granulaire de la matrice cimentaire à ce taux de substitution, à plus forts taux de substitution du ciment par les additions. Le besoin en adjuvants croît proportionnellement avec la quantité d'additions dans le mélange, mais diffère d'une addition à une autre.

- Les performances mécaniques à 7 jours, des bétons GCC-SP avec les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv) croissent jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment, puis commencent à décroître proportionnellement aux taux de substitution du ciment par les additions. Pour le laitier granulé (La), elles se maintiennent jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment puis commencent à décroître. Pour la pouzzolane naturelle (Pz), elles diminuent directement sans aucune amélioration. A 28 jours, les performances mécaniques des bétons GCC-SP avec la pouzzolane naturelle (Pz), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv) diminuent sans aucune amélioration. Pour le laitier granulé (La), elles croissent jusqu'à 20 % du taux de substitution du ciment puis commencent à décroître.

- Les performances mécaniques des bétons GVR-SP avec additions minérales sont pratiquement similaires à celles des bétons GCC-SP à l'exception de la pouzzolane naturelle (Pz) qui affiche à 28 jours, une amélioration à 10 % du taux de substitution du ciment.

- L'effet des additions minérales sur les performances mécaniques des bétons GCC-SP et GVR-SP à 28 jours est dû en premier lieu à la réduction de la quantité d'eau dans les mélanges à même ouvrabilité, par l'utilisation du superplastifiant (SP). En second lieu, il est dû à l'activité chimique de l'addition même.

- Il en résulte donc que les résultats obtenus pour les bétons avec additions minérales et superplastifiant, rejoignent globalement les résultats avancés pour les mortiers.

CHAPITRE V

EFFET DES ADDITIONS

SUR LA R.A.S DES MORTIERS

CHAPITRE V

Effet des Additions sur la Réaction Alkali-Silice des Mortiers

V.1	INTRODUCTION	90
V.2	CHOIX DES GRANULATS ET DE LA METHODE D'ESSAI.....	90
V.3	FORMULATION DES MORTIERS.....	90
V.4	EFFET DES ADDITIONS SUR LES VARIATIONS PONDÉRABLES ET DIMENSIONNELLES DES MORTIERS AFFECTES	93
V.5	EFFET DES ADDITIONS SUR LA FISSURATION DES MORTIERS AFFECTES	96
V.6	CORRÉLATION FISSURATION/VARIATION DIMENSIONNELLE DES MORTIERS.....	97
V.7	EFFET DES ADDITIONS SUR LES PROPRIETES MECANQUES DES MORTIERS AFFECTES.....	98
V.7.1	Effet des additions sur les courbes (σ - ϵ) des mortiers affectés.....	98
V.7.2	Effet des additions sur la résistance à la traction des mortiers affectés	102
V.7.3	Effet des additions sur la résistance en compression des mortiers affectés	105
V.7.4	Effet des additions sur le module d'élasticité des mortiers affectés.....	107
V.8	CORRELATION ENTRE LA VARIATION DIMENSIONNELLE ET LA PERTE DES RESISTANCES	110
V.9	CONCLUSION.....	112

Chapitre V

Effet des Additions sur la Réaction Alkali-Silice des Mortiers

V.1. INTRODUCTION

Les essais physiques et mécaniques dont il a été rendu compte au chapitre III et IV ont fourni les premiers résultats concernant les effets des additions minérales utilisés sur les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers et bétons. Le cinquième et le sixième chapitre sont destinés à poursuivre nos investigations sur le rôle préventif des additions minérales vis à vis de la réaction alcali-silice (RAS) des mortiers et bétons contenant des granulats alcali réactifs. Ce chapitre consistait à montrer que, les additions minérales, quelle que soit leur nature minéralogique dès lors qu'ils contiennent de la silice soluble, peuvent être utilisés pour limiter voire neutraliser les désordres dus à la RAS. Il a été décidé de conduire le programme expérimental sur mortiers, car ces derniers exigent moins de quantité de matériaux que les bétons, permettant ainsi des manipulations plus nombreuses et plus rapides.

V.2. CHOIX DES GRANULATS ET DE LA METHODE D'ESSAI

Nous utiliserons deux granulats, un granulat réactif qu'est le verre à vitre recyclé (GVR) et un granulat de référence de type calcaire concassé (GCC). Les caractéristiques de ces granulats sont définies au chapitre II. Nous devons juger l'influence des additions minérales sur la RAS, on les testant des éprouvettes de mortier 4 x 4 x 16 enrichies en alcalins, autoclavés pendant 5h à une température de 127 °C et à une pression de 0.15 MPa, selon l'essai accéléré par autoclave (norme NF P 18 - 590) qui a l'avantage de fournir des résultats rapidement (procédure d'essai déjà décrite au chapitre II). Nous attendons deux types d'information de l'essai par autoclavage :

- évaluation du degré de réactivité des granulats et de l'activité inhibitrice des additions minérales.
- optimisation des conditions d'emploi de ces additions dans les bétons.

V.3. FORMULATION DES MORTIERS

- **Sable** : la norme régissant cet essai nous impose un sable de granularité entre 0.16 et 5 mm réparti, pour chaque gâchée, de la manière suivante :

Tableau V. 1. Répartition des granulats utilisés dans l'essai d'autoclavage

Classe granulaire	Pourcentage en masse
0.16 - 0.315	10
0.315 - 0.63	10
0.63 - 1.25	25
1.25 - 2.5	25
2.5 - 5	30

La préparation de ces quantités est faite par tamisage et lavage. Les fractions obtenues sont ensuite séchées dans le four à 80 °C et conservées dans des sacs plastiques en attendant la préparation du mortier.

- **Ciment :**

Le ciment est un ciment Portland CEM 1 42.5 R, à teneur en alcalin égal à 0.80 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{équivalent}}$. Ses caractéristiques détaillées sont données au chapitre II, comme nous l'avons déjà mentionné dans les chapitres précédents, nous avons remplacé des volumes progressifs de ciment par des additions minérales afin d'inhiber l'effet de l'alcali-réaction. Il s'agit de cinq additions minérales : laitier granulé (La), pouzzolane naturelle (Pz), fumée de silice (Fs), fillers calcaires (Fc) et poudre de verre (Pv). Leurs caractéristiques sont détaillées au chapitre II, les taux de substitution du ciment sont : 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % et 50 %. Chaque mélange doit être enrichi par ajout de NaOH dans l'eau de gâchage pour obtenir 4 % d'équivalent de Na_2O par rapport à la masse totale du liant. Afin de déterminer la quantité de cet ajout, il est primordial de faire un bilan d'alcalins.

Pour calculer ce bilan nous avons appliqué une méthode proposée par "LCPC (1994), les recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali réaction". Cette méthode repose sur la connaissance des teneurs en alcalins totaux sur l'ensemble des constituants entrant dans la composition des ciments ainsi que de leurs proportions respectives dans le mélange, le principe du calcul consiste alors à en affecter un coefficient d'activité puis à appliquer une relation conventionnelle :

$$A_1 = (1 - G) (K.a_K + V.0,17.a_v + L.0,5.a_L + S.0,5.a_s + Z.0,17.a_z) + G.A_G \dots\dots\dots (V. 1)$$

Dans cette relation, les termes a_x et X (X = K, V, L, S, Z ou G) correspondent respectivement aux teneurs en alcalins totaux équivalents et aux pourcentages en constituants, précisés dans la liste de la marque NF Liants hydrauliques. On désigne alors par K le clinker, V les cendres volantes, L le calcaire, S le laitier, Z les pouzzolanes naturelles et G le gypse. Ils sont liés par la relation (hors gypse) :

$$K + (V + L + S + Z) = 1 \dots\dots\dots (V. 2)$$

Pour chaque constituant, un coefficient « d'activité » en alcalins a également été défini :

- 1 pour le clinker et le gypse,
- 0.5 pour les laitiers et les fines calcaires,
- 0.17 pour les cendres volantes et les pouzzolanes naturelles.

Tableau V. 2. Bilan des alcalins.

		% Na_2O	% K_2O	% Na_2O équivalent = % Na_2O + 0.658 K_2O
Ciment		0.24	0.86	0.80
Granulats	GCC	-	-	-
	GVR	13.37	0.19	13.50
Additions minérales	laitier granulé	-	-	-
	pouzzolane naturelle	4.05	1.60	5.10
	fumée de silice	-	-	-
	fillers calcaires	0.12	0.12	0.20
	poudre de verre	13.37	0.19	13.50

La quantité totale de Na_2O équivalent, dans chaque mélange, est déduite en additionnant celle présente dans le ciment, les additions minérales et le granulat. Les quantités de la soude à ajouter sont présentées au tableau V. 3.

Nous avons fabriqué les différentes compositions des mortiers décrites dans le tableau V. 3. La dénomination de chaque mortier désigne, dans l'ordre : l'origine de granulat, repérée par une lettre majuscule, l'origine des additions minérales, repérée par : La, Pz, Fs, Fc, Pv, leur pourcentage. Par exemple, V-La. 20 % signifie mortier à granulat de verre recyclé avec 20 % de substitution de ciment par le laitier.

Tableau V. 3. Appellations des différents mélanges de mortier

N°	Additions minérales					%						Appellations
	La	Pz	Fs	Fc	Pv	0	10	20	30	40	50	
01												Ref-0 %
02						x						V-0%
03	x						x					V-La.10 %
04	x							x				V-La.20 %
05	x								x			V-La.30 %
06	x									x		V-La.40 %
07	x										x	V-La.50 %
08		x					x					V-Pz.10 %
09		x						x				V-Pz.20 %
10		x							x			V-Pz.30 %
11		x								x		V-Pz.40 %
12		x									x	V-Pz.50 %
13			x				x					V-Fs.10 %
14			x					x				V-Fs.20 %
15			x						x			V-Fs.30 %
16			x							x		V-Fs.40 %
17			x								x	V-Fs.50 %
18				x			x					V-Fc.10 %
19				x				x				V-Fc.20 %
20				x					x			V-Fc.30 %
21				x						x		V-Fc.40 %
22				x							x	V-Fc.50 %
23					x		x					V-Pv.10 %
24					x			x				V-Pv.20 %
25					x				x			V-Pv.30 %
26					x					x		V-Pv.40 %
27					x						x	V-Pv.50 %

Tableau V. 4. Composition des mortiers (quantités pour 3 éprouvettes 4x4x16 cm)

Mortier		Ciment (g)	Eau (l)	E/C	Granulat (g)	Additions minérales		NaOH (g)
						(%)	Quantité (g)	
1	Ref-0 %	450	260	0.58	1350	0	0	14.45
2	V-0 %	450	195	0.43	1350	0	0	14.45
3	V-La.10 %	405	205	0.51	1350	10	43.650	14.65
4	V-La.20 %	360	200	0.56	1350	20	87.300	14.86
5	V-La.30 %	315	199	0.63	1350	30	130.95	15.07
6	V-La.40 %	270	190	0.70	1350	40	174.60	15.28
7	V-La.50 %	225	185	0.82	1350	50	218.30	15.49
8	V-Pz.10 %	405	195	0.48	1350	10	39.750	14.75
9	V-Pz.20 %	360	195	0.54	1350	20	79.500	15.06
10	V-Pz.30 %	315	195	0.62	1350	30	119.25	15.36
11	V-Pz.40 %	270	195	0.72	1350	40	159.00	15.67
12	V-Pz.50 %	225	195	0.87	1350	50	198.75	15.97
13	V-Fs.10 %	405	211	0.52	1350	10	33.600	14.80
14	V-Fs.20 %	360	215	0.60	1350	20	67.200	15.16
15	V-Fs.30 %	315	243	0.77	1350	30	100.80	15.51
16	V-Fs.40 %	270	240	0.89	1350	40	134.40	15.87
17	V-Fs.50 %	225	275	1.22	1350	50	168.00	16.22
18	V-Fc.10 %	405	180	0.45	1350	10	40.000	14.50
19	V-Fc.20 %	360	185	0.51	1350	20	80.000	14.57
20	V-Fc.30 %	315	190	0.60	1350	30	120.00	15.20
21	V-Fc.40 %	270	190	0.70	1350	40	170.00	15.65
22	V-Fc.50 %	225	195	0.87	1350	50	225.00	15.86
23	V-Pv.10 %	405	200	0.49	1350	10	35.000	14.35
24	V-Pv.20 %	360	210	0.58	1350	20	65.000	14.52
25	V-Pv.30 %	315	220	0.70	1350	30	110.00	15.40
26	V-Pv.40 %	270	225	0.83	1350	40	156.00	15.60
27	V-Pv.50 %	225	230	1.02	1350	50	185.00	16.10

Le malaxage des constituants et la mise en place dans les moules 4 x 4 x 16 (avec emplacements pour plots de mesure d'expansion) ont été exécutés selon les directives de la norme NF EN 196 - 1.

V.4. EFFET DES ADDITIONS SUR LES VARIATIONS PONDÉRABLES ET DIMENSIONNELLES DES MORTIERS AFFECTES

Nous avons appliqué aux éprouvettes de mortier, dès leur démoulage, les procédures de mesures et de conservation telles que définies par la norme NF P 18-590 (rappelées au chapitre II). Les résultats sont traduits par la figure V.1 et la figure V. 2 en termes de variations pondérales et dimensionnelles des différents mortiers, respectivement, la figure V. 3 présente la réduction des variations dimensionnelles par les additions minérales et la figure V. 4 présente une corrélation entre les variations dimensionnelles et les variations pondérales. Les valeurs correspondent à la moyenne des mesures sur trois éprouvettes.

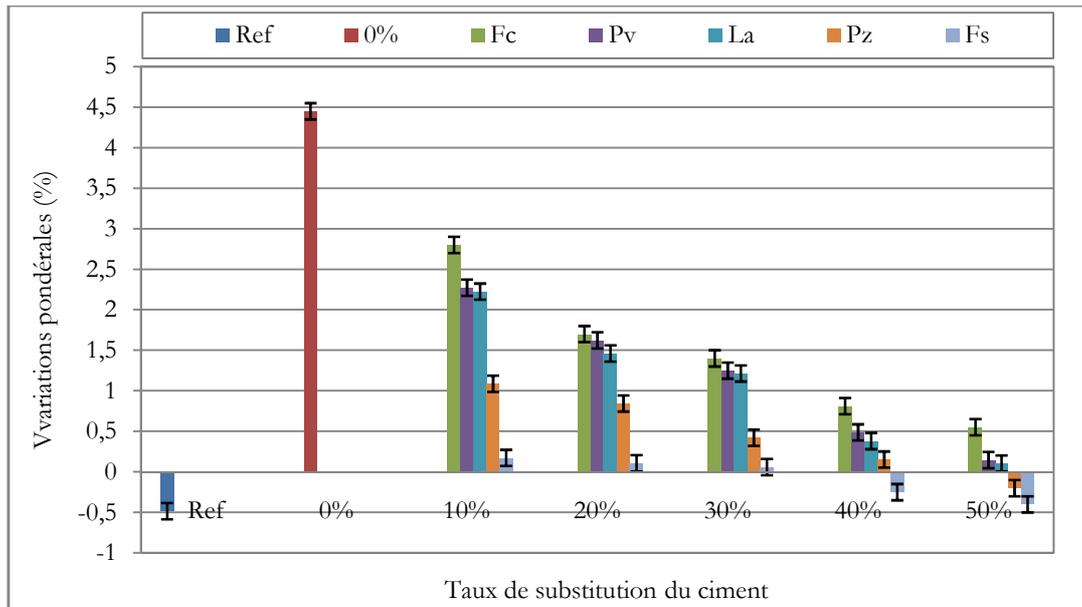


Figure V. 1. Effet des additions sur les variations pondérales des mortiers.

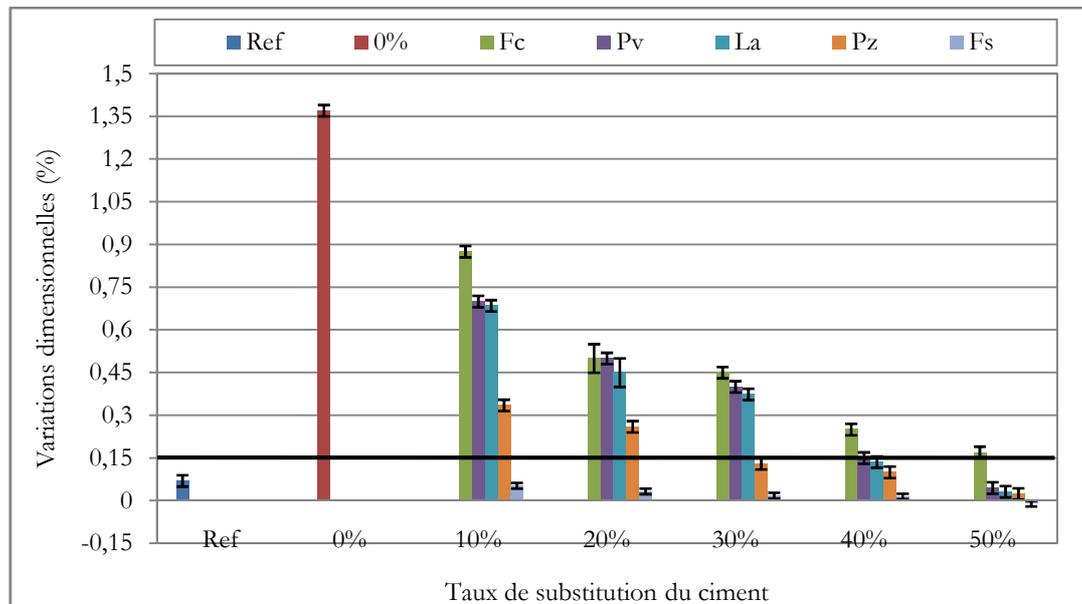


Figure V. 2. Effet des additions sur les variations dimensionnelles des mortiers.

Les variations dimensionnelles et pondérales des mortiers montrent des valeurs tout à fait courantes, pour le mortier de référence (granulat non-réactif), on constate une variation dimensionnelle de 0.07 % inférieure à 0.15 % (valeur imposée par la norme XP P18 – 594, au-delà de laquelle le mortier est considéré potentiellement réactif), et une variation pondérale de -0.49%, cette déformation non nulle correspondant à une variation volumique du squelette solide d'origine chimique (retrait chimique due à l'hydratation). Le mortier sans additions minérales (V0 %) a effectivement provoqué une variation dimensionnelle importante de 1.37 % supérieure à la valeur-limite 0.15 %, et une variation pondérale importante de 4.45 %, qui peut être justifiée comme la quantité d'eau imbibée par le gel alcali silicate formé par la réaction alcali-silice. Les variations dimensionnelles et pondérales des éprouvettes de mortier avec additions minérales sont décroissantes avec le taux de substitution de ciment, pour toutes les additions minérales. On

peut classer les additions du plus efficace jusqu'au moindre, à réduire les variations dimensionnelles et pondérales de cette façon : fumée de silice, poudre de verre, laitier granulé, poudre de verre et fillers calcaires.

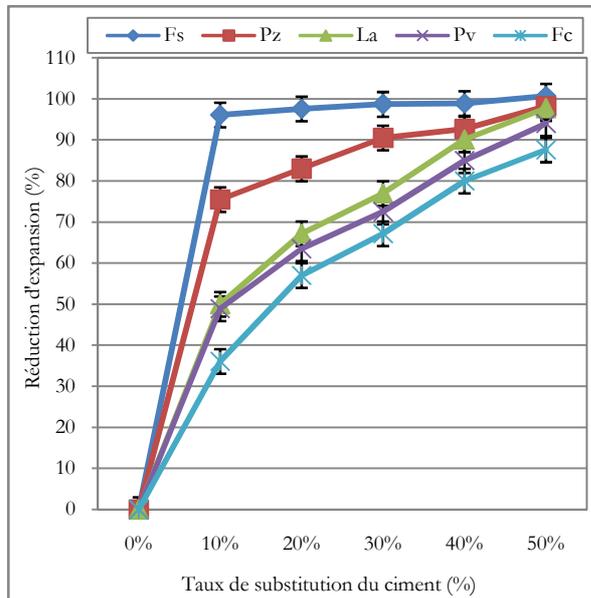


Figure V. 3. Réduction des variations dimensionnelles par les additions.

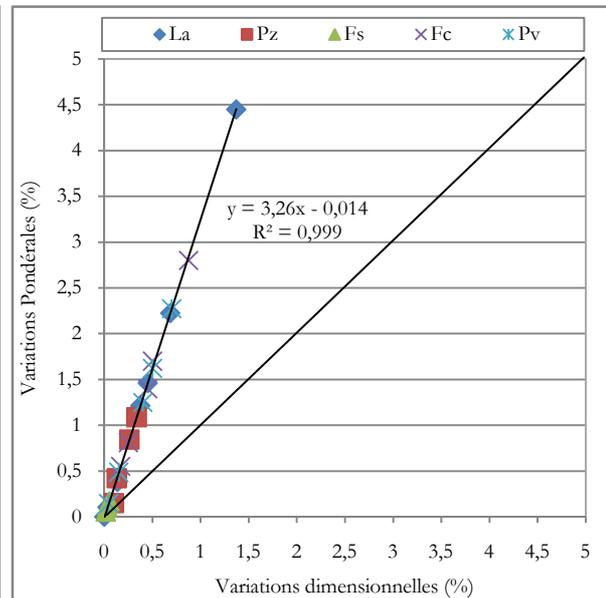


Figure V. 4. Corrélation entre les variations dimensionnelles et les variations pondérales des mortiers.

La figure V. 3 montre que la réduction des variations dimensionnelles est croissante avec le taux de substitution de ciment par toutes les additions minérales. La réduction de la variation dimensionnelle, due à l'ajout de la fumée de silice (Fs) dans les mortiers à base de granulat potentiellement réactif, croît directement pour le taux 10 % de substitution du ciment, puis elle continue stable pour les plus élevés taux de substitutions du ciment par l'addition. La pouzzolane naturelle (Pz) présente une efficacité à contrer les effets néfastes de la RAS, meilleure que celle de laitier granulé (La). La réduction des variations dimensionnelles due à la substitution du ciment par cette addition décroît progressivement jusqu'au taux de 30 % de substitution du ciment, puis elle devient constante. Les effets du laitier granulé (La) et de la poudre de verre (Pv) sont identiques, avec une meilleure efficacité de laitier granulé, ou la réduction des variations dimensionnelles est progressive jusqu'au taux de 50 % de substitution de ciment. Le fillers calcaires (Fc) est l'addition la moins efficace à contrer la RAS, même pour le taux de 50 % de substitution du ciment par cette addition, la variation dimensionnelle des mortiers est toujours supérieure à 0,15 %. Nous concluons que les additions minérales étudiées jouent effectivement le rôle de réducteur de la variation dimensionnelle avec des intensités très différentes, ceci est en accord avec la littérature existante [Zubair L. M. 2018] et [Chun. T. C. et al. 2013].

La figure V. 4 présente une corrélation entre la variation dimensionnelle et la variation pondérale des éprouvettes des mortiers affectées par la RAS. Nous remarquons qu'il existe une forte corrélation entre les mesures effectuées. Tous les points expérimentaux suivent une droite parallèle à la bissectrice d'équation $\Delta m = 3,26 \Delta l$, du côté de l'axe des variations pondérales. Ceci suggère, que les variations dimensionnelles des mortiers dus à la RAS tournent autour d'un quart des variations pondérales, en valeur inférieure.

V.5. EFFET DES ADDITIONS SUR LA FISSURATION DES MORTIERS AFFECTES

Comme les effets délétères de la RAS ne se traduisent pas uniquement sous forme de variations dimensionnelles et pondérales des mortiers, mais la plupart du temps apparaît également une fissuration superficielle, plus ou moins dense, par laquelle peuvent se manifester (ou non) des exsudations de gel. Nous avons photographié les éprouvettes de mortier après la mesure de leurs variations dimensionnelles et pondérales (pour quelques éprouvettes de mortier, et le traçage des fissures a été souligné à l'encre préalablement). Ensuite, les mesures de la largeur et la densité des fissures ont été relevées à l'aide d'une lunette micrométrique pour la détection des fissures ayant un grossissement de 24 x et réticule 4 mm/0.02. Les mesures ont été évaluées sur 15 points pour chaque éprouvette de mortier afin d'obtenir des valeurs moyennes pertinentes. Les éprouvettes de mortier ont ensuite été soumises à des essais de résistance en traction par flexion et en compression. La largeur et la densité des fissures mesurées sont présentées par le tableau V. 5 et la figure V. 5.

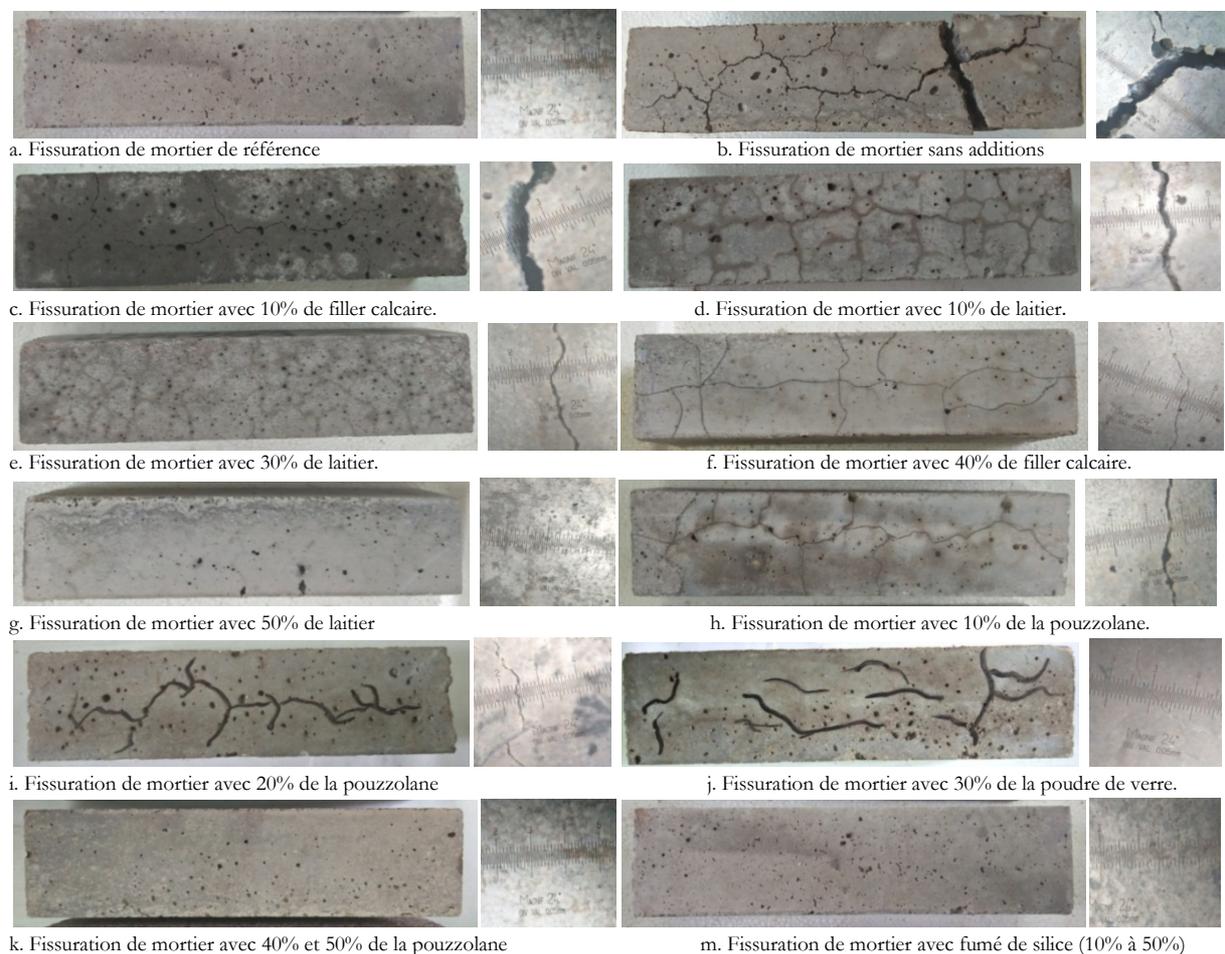


Figure V. 5. Fissuration des différents mortiers.

On remarque qu'aucune fissure n'a été observée pour le mortier de référence, tous les mortiers qui contiennent la fumée de silice, les mortiers qui contiennent plus de 30 % de laitier granulé et de la pouzzolane naturelle et les mortiers qui contiennent plus de 40 % de la poudre de verre et des fillers calcaires.

Tableau V. 5. Largeur et densité de fissuration des différents mortiers.

Taux de substitution de ciment	Granulat non réactif		Granulat réactif		Filler calcaire		Poudre de verre		Laitier granulé		Pouzzolane naturelle		Fumée de silice	
	LF	DF	LF	DF	LF	DF	LF	DF	LF	DF	LF	DF	LF	DF
	mm	mm/cm ²	mm	mm/cm ²	mm	mm/cm ²	mm	mm/cm ²	mm	mm/cm ²	mm	mm/cm ²	mm	mm/cm ²
0 %	0.00	0.000	0.90	10.938	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10 %	-	-	-	-	0.75	7.015	0.60	6.932	0.50	5.938	0.10	4.375	0.00	0.000
20 %	-	-	-	-	0.71	6.250	0.30	6.130	0.15	5.000	0.05	3.125	0.00	0.000
30 %	-	-	-	-	0.74	5.333	0.27	4.200	0.10	3.125	0.03	2.125	0.00	0.000
40 %	-	-	-	-	0.59	3.125	0.18	3.415	0.05	2.500	0.00	0.000	0.00	0.000
50 %	-	-	-	-	0.54	2.400	0.08	1.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000

LF : Largeur de fissure (mm).
DF : Densité de fissure (mm/cm²).

Pour les autres mortiers, nous avons constaté que les fissures apparues dans le mortier en granulat réactif sans additions minérales (V0 %) sont les plus ouvertes. Concernant l'action des additions minérales ; on constate que l'incorporation de la fumée de silice supprime toute fissure superficielle visible, le laitier granulé, la pouzzolane naturelle et la poudre de verre n'annulent pas la fissuration que pour des taux supérieurs à 40 % de substitution volumique de ciment. L'incorporation des fillers calcaires réduit légèrement la fissuration des éprouvettes de mortiers.

V.6. CORRÉLATION FISSURATION/VARIATION DIMENSIONNELLE DES MORTIERS

La corrélation entre la largeur des fissures et la variation dimensionnelle des mortiers est présentée sur la figure V. 6-a. La corrélation entre la densité des fissures et la variation dimensionnelle des mortiers est présentée par la figure V. 6-b.

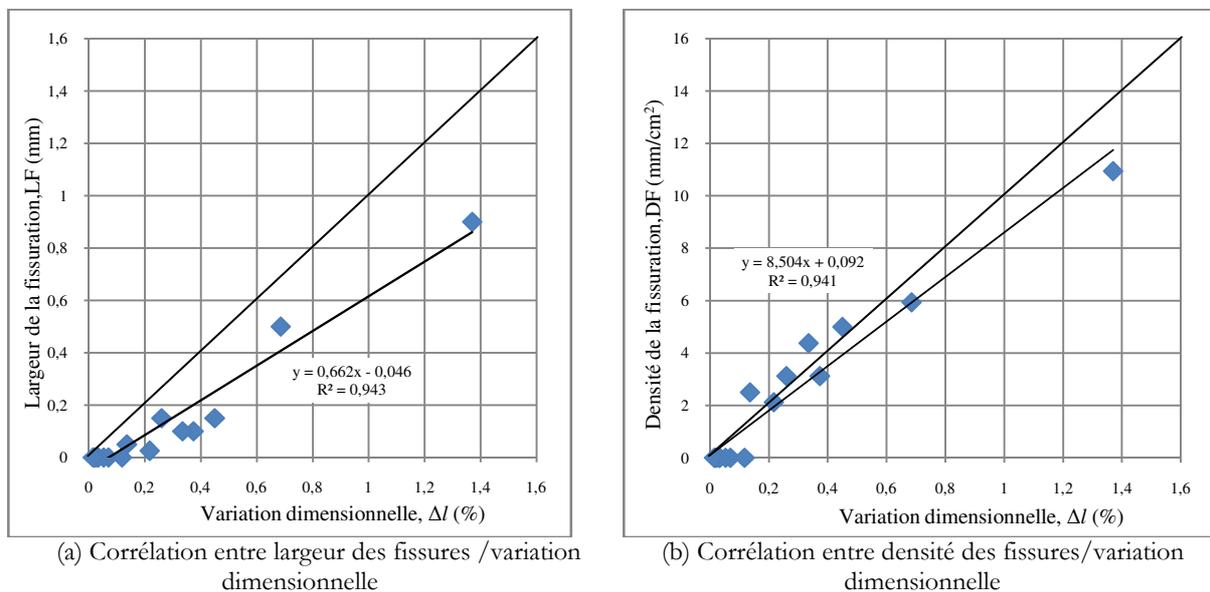


Figure V. 6. Corrélation entre fissuration/variation dimensionnelle des mortiers

La figure V. 6 présente une corrélation entre la fissuration et la variation dimensionnelle. On constate que les valeurs de la largeur et de la densité des fissures n'augmentent pas simultanément avec les valeurs de la variation dimensionnelle. La figure V. 6-a permet de

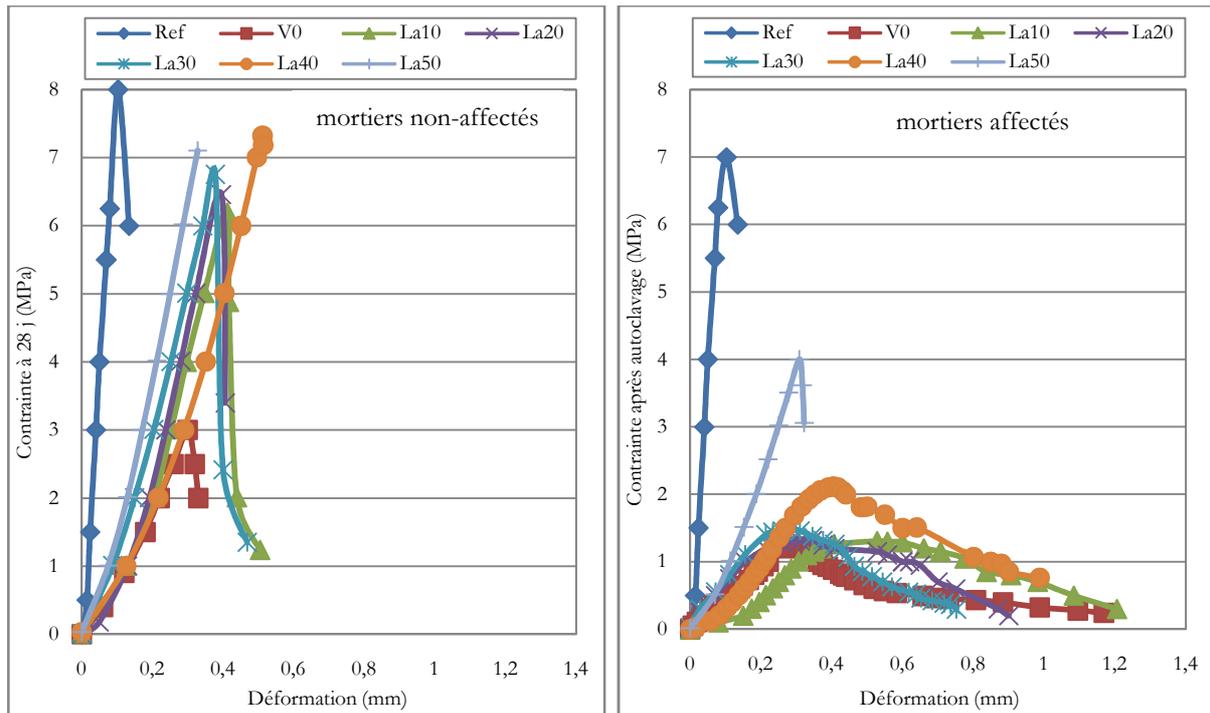
constater qu'il existe une forte corrélation entre les largeurs des fissures (LF) et les variations dimensionnelles (Δl). Tous les points expérimentaux des mesures suivent une droite tangente à la bissectrice d'équation $LF = 0.662\Delta l$, du côté de l'axe des variations dimensionnelles. Ceci montre, que les variations dimensionnelles des mortiers dus à la RAS (Δl) sont légèrement plus importantes que les largeurs des fissures (LF). De même, la figure V. 6-b, montre qu'il existe une forte corrélation entre les densités des fissures (DF) et les variations dimensionnelles (Δl). Tous les points expérimentaux des mesures sont tangents à la bissectrice d'équation $DF = 8.504\Delta l$, du côté de l'axe des variations dimensionnelles. Ceci montre, que les variations dimensionnelles des mortiers dus à la RAS (Δl) tournent autour d'un dixième des densités des fissures (DF).

V.7. EFFET DES ADDITIONS SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DES MORTIERS AFFECTES

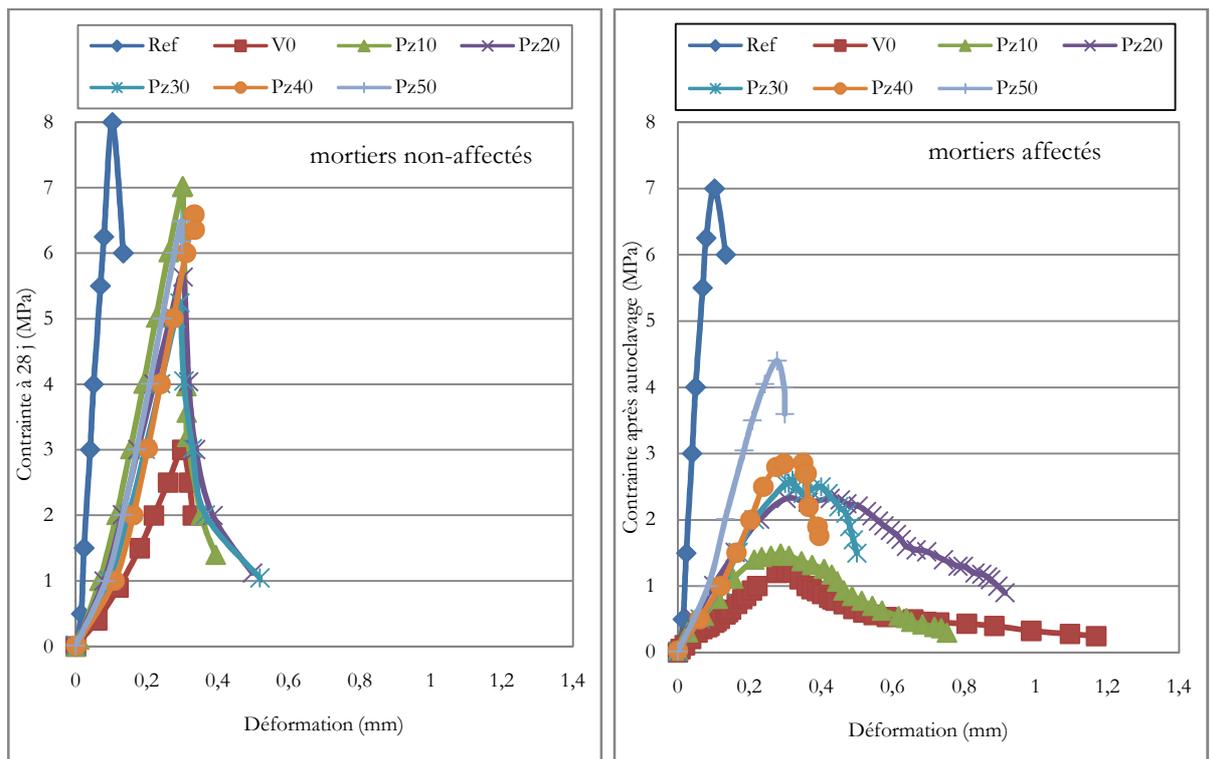
Après les mesures des variations pondérales et dimensionnelles, les éprouvettes de mortier ont été soumises à des essais mécaniques. Nous avons testé les éprouvettes en deux moitiés par un essai de flexion 3 points, puis nous avons testé ces deux moitiés par un essai de compression, selon la norme EN 196 - 1. La machine utilisée est une machine Zwick/Roe II Z020, dont le pilotage et l'acquisition des résultats se font par ordinateur à partir du logiciel testXpert II. Deux séries des essais sur mortiers ont été effectués, la première série contient les 27 formulations des mortiers affectés qu'ils ont subi l'essai accéléré par autoclave, la deuxième série contient les mêmes formulations à l'exception de l'ajout de NaOH. Ils ont subi une cure sous l'eau à la température ambiante jusqu'à 28 jours, ces derniers sont jugés non-affecté par la RAS, suite à l'absence de deux conditions obligatoire pour que la RAS a eu lieu qui sont la température et le taux des alcalins élevés dans la solution interstitielle du mortier. Pour chaque formulation, nous avons testé 03 éprouvettes en traction par flexion, ce qui a entraîné 162 essais. Les moitiés des éprouvettes testées en flexion, ont été testées en compression, ce qui a entraîné 324 essais pour ce dernier essai de compression. A la fin de chaque essai la collecte de données nous a permis de tracer les courbes contraintes-déformations ainsi que les résistances à la traction, à la compression et le module d'élasticité. La substitution du ciment par les additions minérales volume par volume dans un mortier à base de granulats de verre recyclé, jugé potentiellement réactif, engendre une amélioration des propriétés mécaniques pour les mortiers affectés. Nous avons déterminé l'efficacité des additions minérales à contrer les effets néfastes de la RAS, en comparant les résultats obtenus par les mortiers affectés avec ceux obtenus par les mortiers non-affectés.

V.7.1. Effet des additions sur les courbes (σ - ϵ) des mortiers affectés

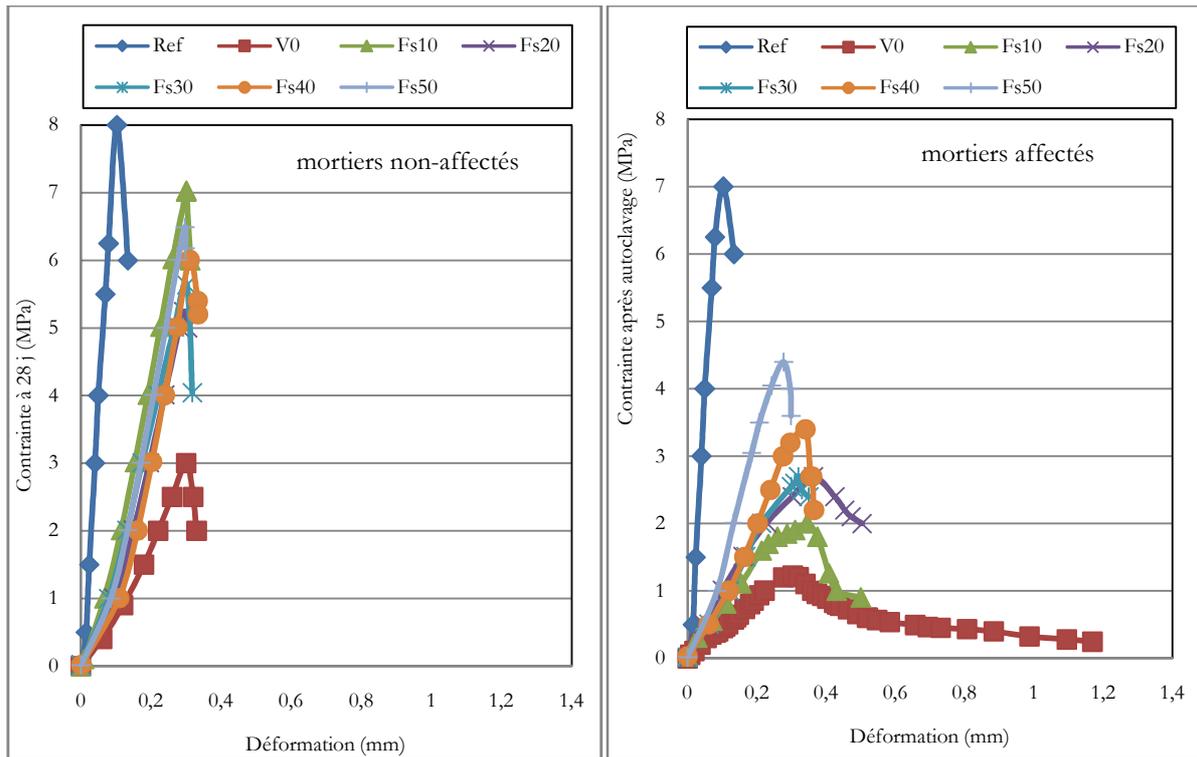
La comparaison des courbes contraintes-déformations en traction par flexion des mortiers non affectés, testés après 28 jours de cure sous l'eau et des mortiers affectés par la RAS testés après l'essai accéléré par autoclave, avec différents taux de substitutions de ciment par les additions minérales est représentée par la figure V. 7.



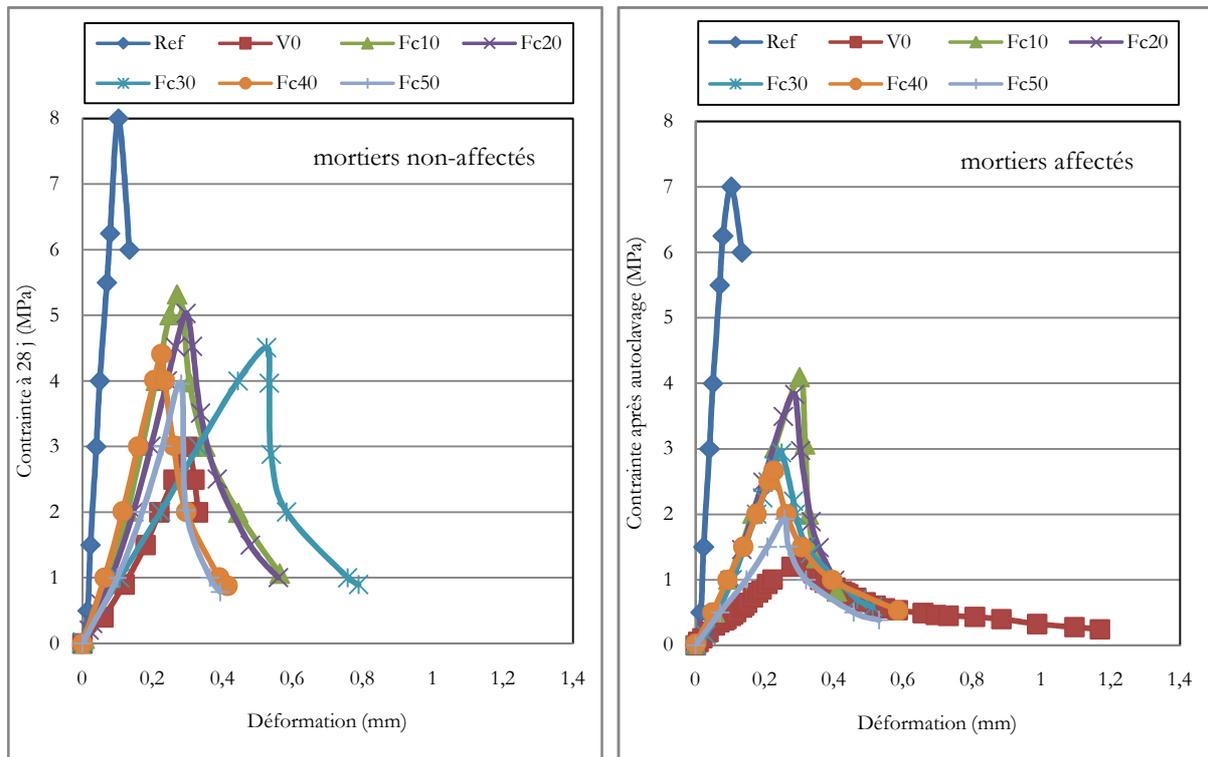
(a) Mortiers avec substitution du ciment par le laitier (La).



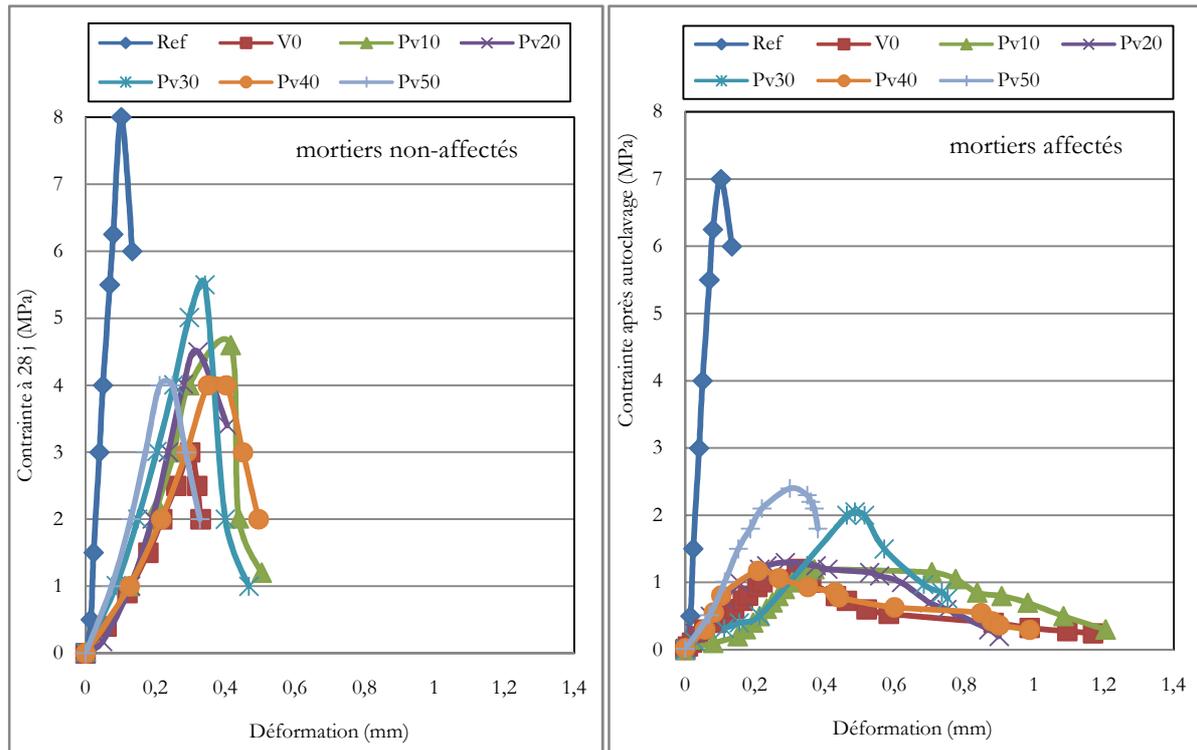
(b) Mortiers avec substitution du ciment par la pouzzolane naturelle (Pz).



(c) Mortiers avec substitution du ciment par la fumée de silice (Fs)



(d) Mortiers avec substitution du ciment par les fillers calcaires (Fc)



(e) Mortiers avec substitution du ciment par la poudre de verre (Pv).

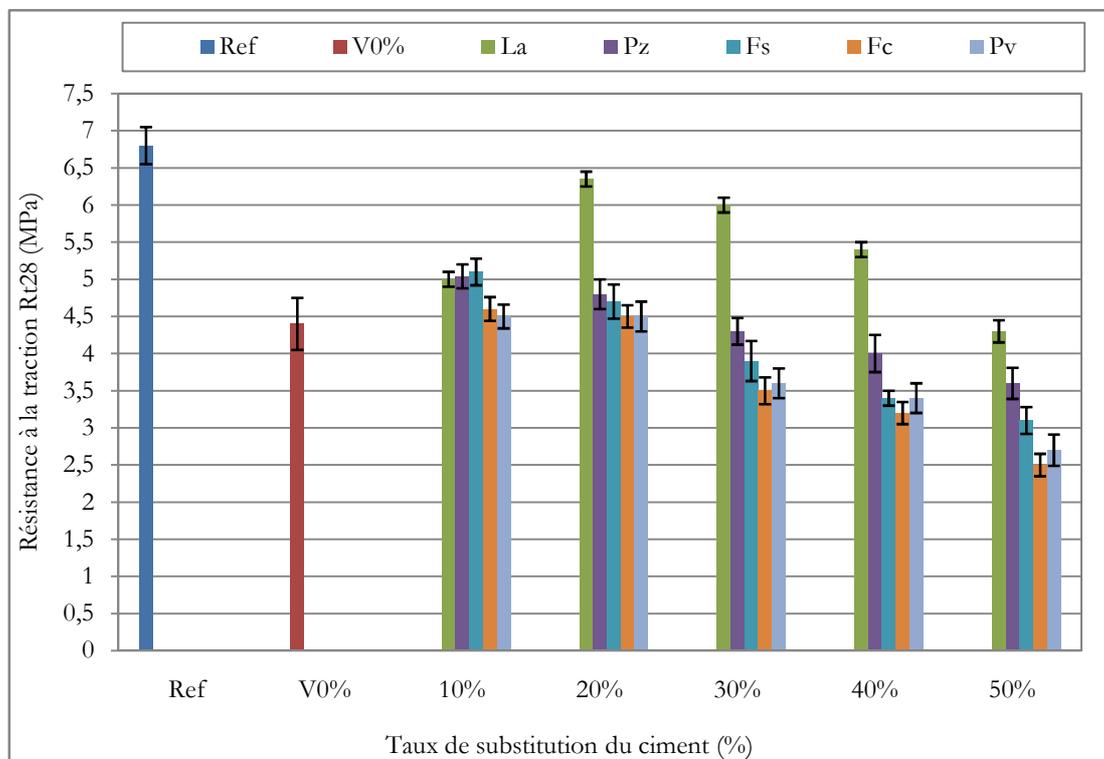
Figure V. 7. Comparaison des courbes contraintes-déformations en traction par flexion des mortiers avec substitution du ciment par les additions minérales.

Cette comparaison nous a permis de confirmer que la RAS engendre une perte considérable de la contrainte à la traction pour tous les types de mortiers. Le mortier de référence montre un comportement élastique jusqu'à la rupture même après l'essai accéléré par autoclave. L'effet de la RAS sur le comportement mécanique du mortier avec granulat réactif sans additions minérales (V0 %) est le plus majeur, où on remarque une importante perte de contrainte et des déformations à la rupture que le mortier affecté, ce qui indique une meilleure ductilité (pas de rupture fragile) grâce à l'amélioration de la compacité de mortier due au remplissage des pores capillaires par le gel formé par la RAS. Le remplacement partiel de 10 % à 50 % du volume de ciment par le laitier granulé (La), la pouzzolane naturelle (Pz), la fumée de silice (Fs), les fillers calcaires (Fc) et la poudre de verre (Pv) améliore considérablement la contrainte du mortier à base de sable de verre recyclé, à 28 jours et après l'essai accéléré par autoclave. À 28 jours pratiquement toutes les courbes présentent un comportement fragile, linéaire - élastique. Au-delà de la valeur-limite d'élasticité, les courbes enregistrent une augmentation graduelle en courbure évaluée autour de 75 à 90 % de la résistance ultime. Au-delà du pic, la courbe présente une partie descendante (déformation contrôlée) jusqu'à la rupture. La variation des courbes contraintes-déformations à 28 jours varie sensiblement avec la nature minéralogique et la qualité d'additions incorporées dans le mélange. L'effet le plus important est due à l'incorporation de la fumée de silice, puis de la pouzzolane naturelle, le laitier granulé, la poudre de verre et finalement à les fillers calcaires. Cette dernière est l'addition qui influe moins sur le comportement mécanique à 28 jours des mortiers à base de verre recyclé.

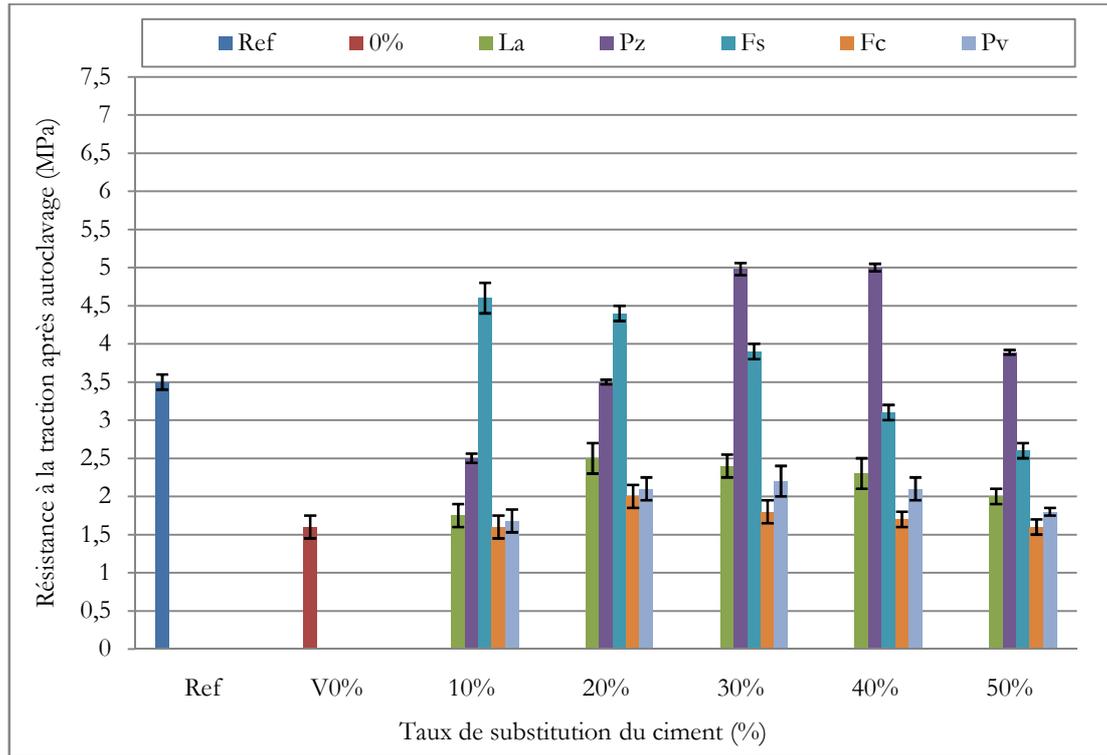
Après l'essai accéléré par autoclave, les courbes présentent un comportement ductile initié par une courte partie linéaire élastique. Au-delà de la valeur-limite d'élasticité, les courbes enregistrent une augmentation graduelle en courbure. Sans aucun pic déterminé pour les faibles taux de substitution de ciment par les additions, les courbes présentent une longue partie descendante (déformation importante) jusqu'à la rupture. La variation des courbes contraintes-déformations après l'essai accéléré par autoclave varie sensiblement avec la nature minéralogique et la qualité d'additions incorporées dans le mélange. On remarque que l'incorporation de 10 % de fumée de silice (Fs) améliore plus la contrainte et réduit les importantes déformations enregistrées par le mortier à base de sable recyclé sans addition V0 %. Les bienfaits de la pouzzolane naturelle (Pz) sont plus apparents à 20 % de taux de substitution de ciment par l'addition, avec une efficacité meilleure que le laitier granulé. Le laitier granulé (La) et la poudre de verre (Pv) ne montrent aucune influence claire jusqu'à 30 % de taux de substitution de ciment par ces additions, idem que pour le comportement mécanique des fillers calcaires (Fc), qui influe moins sur la RAS des mortiers à base de verre recyclé. On remarque que plus le taux de substitution de ciment par les additions minérales augmente plus leur efficacité à contrer les effets néfastes de la RAS s'améliore.

V.7.2. Effet des additions sur la résistance à la traction des mortiers affectés

Les variations des résistances à la traction à 28 jours et après l'essai accéléré par autoclave des mortiers de sable de verre recyclé sont représentées, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales, sur la figure V. 8.



(a) Mortiers à 28 jours



(b) Mortiers après l'essai accéléré par autoclave

Figure V. 8. Variation des résistances à la traction à 28 jours et après l'essai accéléré par autoclave des mortiers de verre recyclé en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.

Nous remarquons que les résistances à la traction à 28 jours et après l'essai accéléré par autoclave des mortiers de sable de verre recyclé avec additions minérales varient sensiblement avec la nature minéralogique et la quantité d'additions incorporées dans le mélange. L'influence des additions minérales sur les résistances à la traction des mortiers affectés et non-affectés, peut être analysée par rapport aux pertes des résistances à la traction due à la RAS, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales (en %), dont :

$$\text{Perte des résistances à la traction} = \frac{Rt_{28j} - Rt_{Autoclave}}{Rt_{28j}} \times 100 \dots\dots\dots (V. 3)$$

avec :

Rt 28j : résistance à la traction à 28 jours du mortier avec addition minérale.

Rt Autoclave : résistance à la traction après autoclavage du mortier avec addition minérale.

La variation des pertes des résistances à la traction pour les mortiers de sable de verre recyclé avec additions minérales est représentée en fonction du taux de substitution du ciment par la figure V. 9.

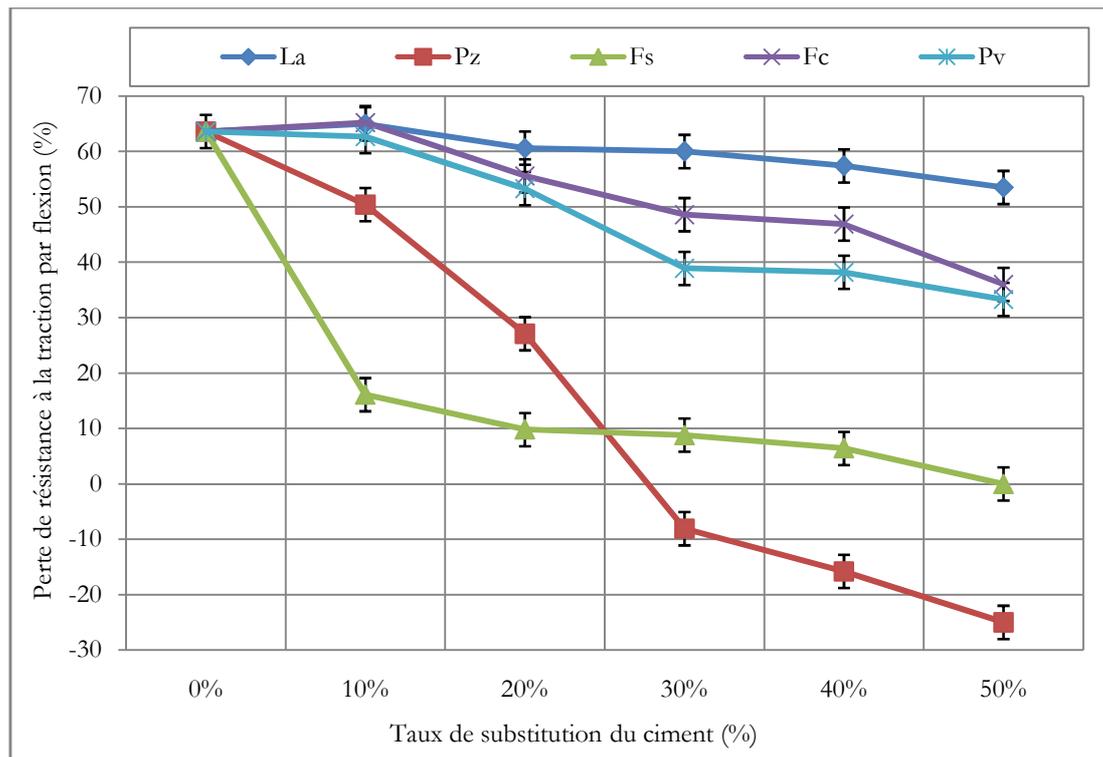
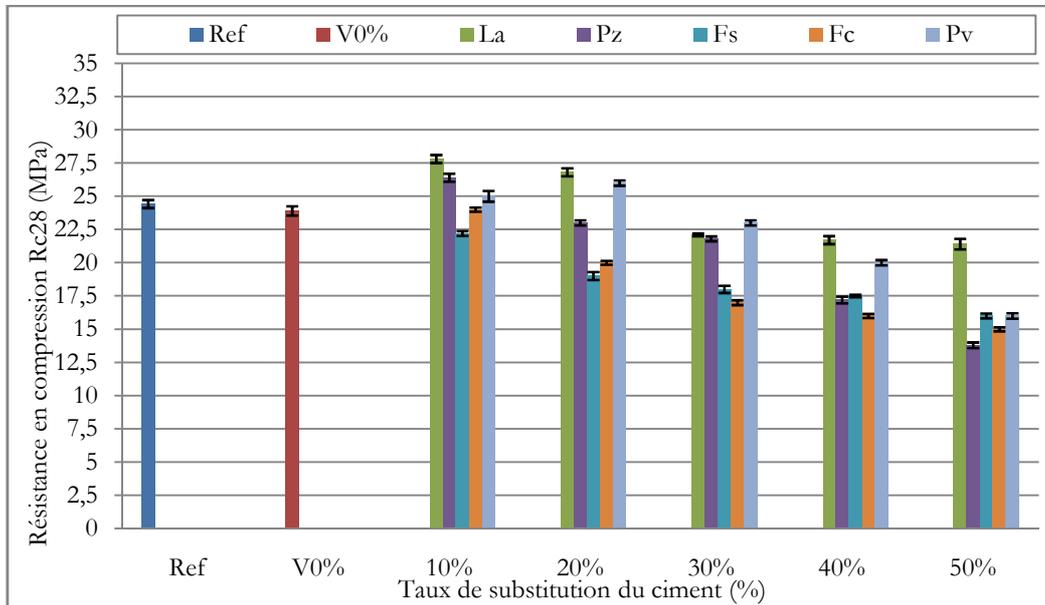


Figure V. 9. Variation des pertes des résistances à la traction due à la RAS des mortiers de verre recyclé en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

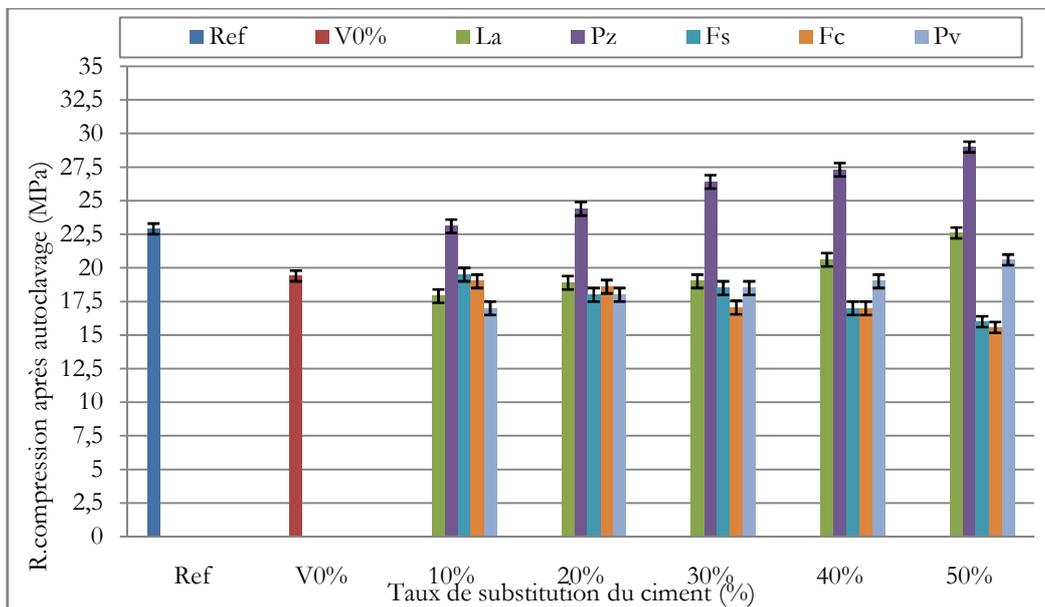
Nous remarquons sur la figure V. 9, que la RAS entraîne une perte de résistance à la traction par flexion observée pour le mortier sans additions minérales (V0 %) de 63.5 %, cette valeur correspond bien avec les résultats obtenus par d'autres auteurs ; Pleau, R., Bérubé, M.A., Pigeon, M., Fournier, B. et Raphael, S., [Pleau, R. et al. 1989], Kohno K., Sugimoto A., et Kashiwai T., [Kohno K., et al. 1989], Swamy et Al Asali [Swamy R.N., et Al Asali M.M., 1989] et Hobbs [Hobbs D.W., 1989], Jones et Clark L.A., [Jones A.E.K. et Clark L.A., 1998], Giaccio G., Zerbino R., Ponce J.M. et Batic O.R., [Giaccio, G. et al. 2008], qui ont trouvé des valeurs comprises entre 42 % et 78 %. L'incorporation des additions minérales a contribué à la réduction de la perte de la résistance à la traction par flexion, en calculant la moyenne de la perte de la résistance à la traction pour les cinq taux de substitution de ciment par chaque addition minérale. On les classe selon l'efficacité à contrer la perte de résistance à la traction dans l'ordre croissant suivant : le laitier granulé par 60 %, le filler calcaire par 50 %, la poudre de verre par 45 %, la fumée de silice par 8 % et finalement la pouzzolane naturelle par 6 %. La fumée de silice et la pouzzolane naturelle ont engendré des gains considérables de résistance à la traction par flexion pour les mortiers avec des taux de substitution de ciment supérieure à 30 % de ces additions, dont les mortiers ont présenté une variation dimensionnelle inférieure au seuil suggéré par la norme XP P18-594 (0.15 %) et ils sont jugés comme des mortiers non-réactifs. Cette réduction de la perte de résistance à la traction par flexion est peut être due à la réaction pouzzolanique des additions observées par l'amélioration considérable de la résistance à la traction par flexion des mortiers de sable de verre recyclé non affecté par la RAS, (qui ont subi une cure sous l'eau durant 28 jours).

V.7.3. Effet des additions sur la résistance en compression des mortiers affectés

Les variations des résistances en compression à 28 jours et après l'essai accéléré par autoclave, des mortiers de sable de verre recyclé avec additions minérales sont représentées en fonction du taux de substitution du ciment par la figure V. 10.



(a) Mortiers à 28 jours



(b) Mortiers après l'essai accéléré par autoclave

Figure V. 10. Variation des résistances en compression à 28 jours et après l'essai accéléré par autoclave des mortiers de verre recyclé en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.

Nous remarquons sur la figure V. 10-a que les résistances en compression à 28 jours des mortiers de sable de verre recyclé avec additions minérales, varient sensiblement avec la nature minéralogique et la quantité d'additions incorporées dans le mélange. Pour les mortiers avec les

additions : laitier granulé (La), pouzzolane naturelle (Pz) et fumée de silice (Fs), les résistances en compression à 28 jours diminuent directement sans aucune inflexion favorable enregistrée. Cette décroissance est proportionnelle aux taux de substitution du ciment par l'addition et elle est plus accentuée pour les mortiers avec fumée de silice (Fs) et filler calcaire (Fc), dont la résistance est inférieure à celle du mortier sans additions minérales. L'addition des fillers calcaires (Fc) ne présente aucune action favorable sur la résistance. La décroissance des résistances en compression pour les mortiers avec le laitier granulé (La) et la pouzzolane naturelle (Pz) à 28 jours est la moins accentuée, avec une meilleure efficacité de laitier par rapport à la pouzzolane naturelle. Au-delà de taux de 30 % de substitution de ciment par cette addition, la décroissance de la résistance en compression devient plus accentuée, et même inférieure à celle du mortier sans additions minérales. Pour des mortiers avec la poudre de verre (Pv), les résistances en compression à 28 jours croissent pour les faibles taux de substitution du ciment et atteignent un maximum au voisinage de 20 %, puis commencent à décroître proportionnellement aux taux de substitution du ciment par l'addition.

Sur la figure V.15-b nous remarquons que les résistances en compression après l'essai accéléré par autoclave des mortiers avec additions minérales varient aussi sensiblement avec la nature minéralogique et la quantité d'additions incorporées dans le mélange. Pour les mortiers avec l'addition pouzzolane naturelle (Pz), les résistances en compression après l'essai accéléré par autoclave croissent proportionnellement aux taux de substitution du ciment par l'addition. Les résistances en compression après l'essai accéléré par autoclave des mortiers avec les additions fumée de silice (Fs) et des fillers calcaires (Fc) diminuent directement sans aucune inflexion favorable enregistrée, cette décroissance est proportionnelle avec les taux de substitution du ciment par l'addition et elle est plus accentuée pour les mortiers avec fumée de silice. Pour les mortiers avec les additions de laitier granulé (La) et de poudre de verre (Pv), les résistances en compression après l'essai accéléré par autoclave diminuent directement et à partir de taux de 10 % de substitution de ciment, elles commencent à accroître proportionnellement avec les taux de substitution du ciment par les additions, avec une intensité plus importante pour les mortiers avec le laitier granulé (La).

Afin de mieux analyser l'influence des additions minérales sur les résistances en compression des mortiers affectés et non affectés, nous avons ramené la résistance en compression des mortiers de sable de verre recyclé avec additions minérales à la perte de la résistance en compression, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales (en %), dont :

$$\text{Perte des résistances en compression} = \frac{Rc_{28j} - Rc_{\text{Autoclave}}}{Rc_{28j}} \times 100 \dots \dots \dots (V. 4)$$

avec :

Rc 28j : résistance en compression à 28 jours du mortier avec addition minérale.

Rc Autoclave : résistance en compression après autoclavage du mortier avec addition minérale.

La variation des pertes des résistances en compression des mortiers de sable de verre recyclé avec additions minérales, est représentée en fonction du taux de substitution du ciment par la figure V.11.

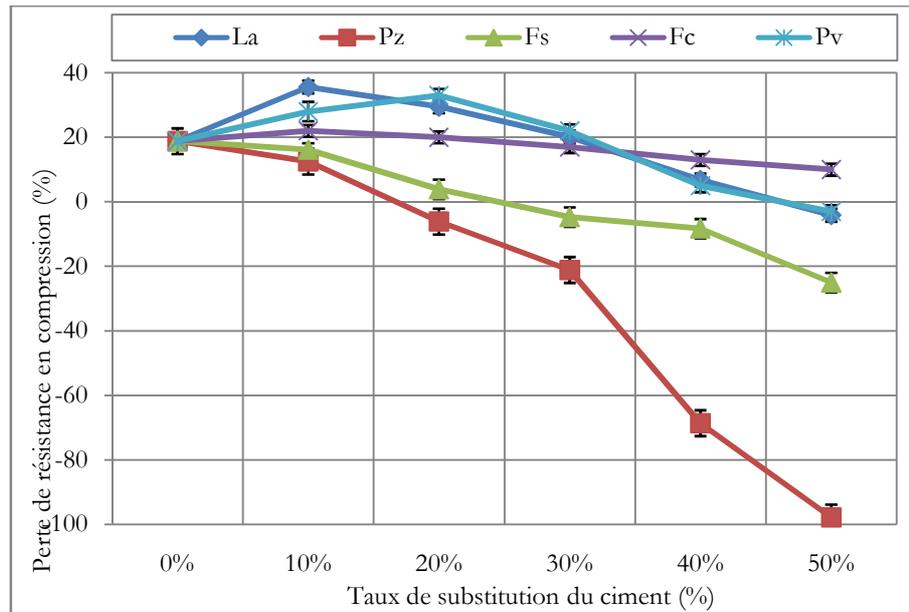


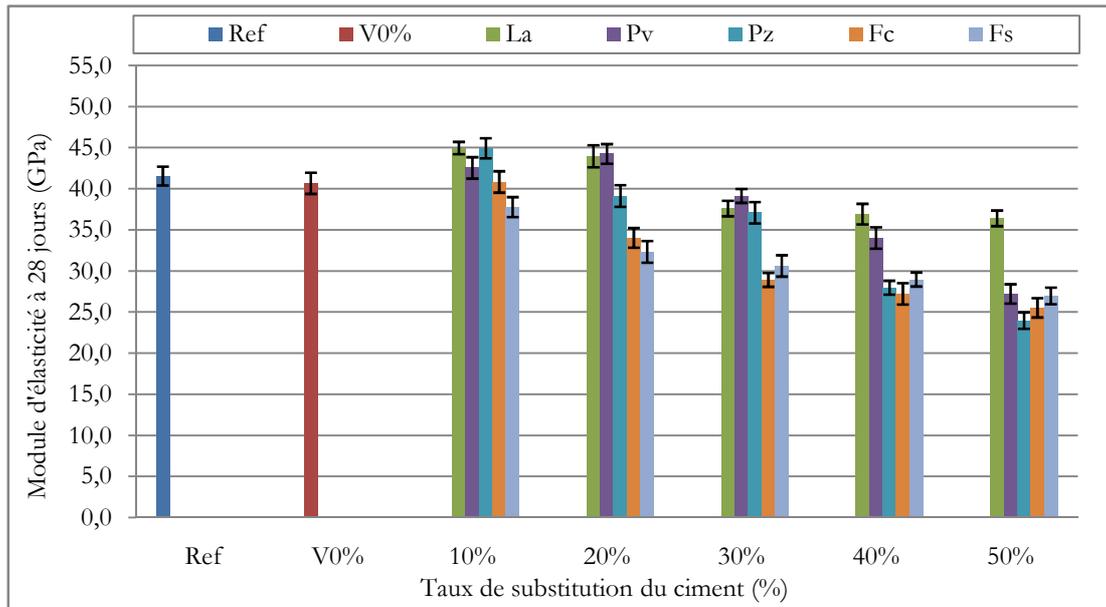
Figure V. 11. Variation des pertes des résistances en compression due à la RAS des mortiers de verre recyclé en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.

Nous remarquons sur la figure V. 11, que la RAS entraîne une perte de résistance en compression observée pour le mortier sans additions minérales (V0 %) de 18.8 %, cette valeur correspond bien avec les résultats obtenus par d'autres auteurs ; [Pleau, R., Bérubé, M.A., Pigeon, M., Fournier, B. et Raphael, S., [Pleau, R. et al. 1989], Kohno K., Sugimoto A., et Kashiwai T., [Kohno K., et al. 1989], Swamy et Al Asali [Swamy R.N., et Al Asali M.M., 1989] et Hobbs [Hobbs D.W., 1989], Jones et Clark L.A., [Jones A.E.K. et Clark L.A., 1998], Giaccio G., Zerbino R., Ponce J.M. et Batic O.R., [Giaccio, G. et al. 2008], ils ont trouvé des valeurs comprises entre 15 % et 27 %.

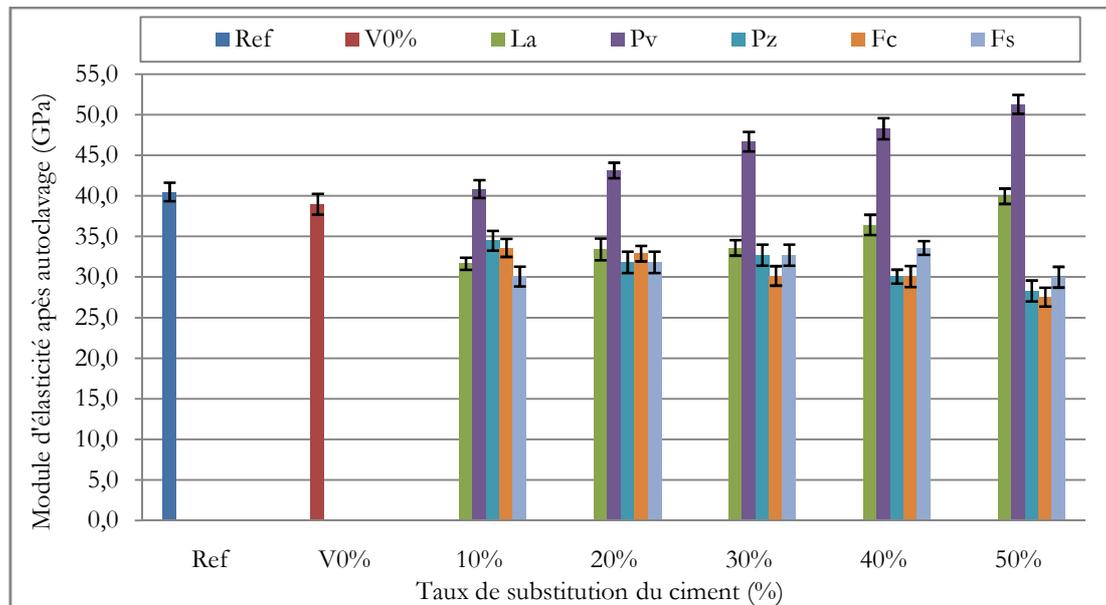
L'incorporation des additions minérales a contribué à la réduction de la perte de la résistance en compression, en calculant la moyenne de la perte de la résistance en compression pour les cinq taux de substitution de ciment par chaque addition minérale. On les classe selon l'efficacité à contrer la perte de résistance en compression dans l'ordre croissant suivant : le laitier granulé par 17.6 %, la poudre de verre par 17 %, le filler calcaire par 16 %, la fumée de silice par -4 % et finalement la pouzzolane naturelle par -35 %. La fumée de silice et la pouzzolane naturelle ont engendré des gains considérables de résistance en compression pour des mortiers qui ont présenté une variation dimensionnelle inférieure à 0.15 % (mortiers jugés non-réactifs selon la norme XP P18-594). Cette réduction de la perte de résistance en compression est peut-être due à la réaction pouzzolanique des additions observées par l'amélioration considérable de la résistance en compression des mortiers qui ont subi une cure sous l'eau durant 28 jours (non affecté par la RAS), avec une meilleure efficacité de la pouzzolane naturelle.

V.7.4. Effet des additions sur le module d'élasticité des mortiers affectés

Les variations des modules d'élasticité à 28 jours et après l'essai accéléré par autoclave, des mortiers de sable de verre recyclé avec additions minérales sont représentées en fonction du taux de substitution du ciment par la figure V. 12.



(a) Mortiers à 28 jours



(b) Mortiers après l'essai accéléré par autoclave

Figure V. 12. Variation des modules d'élasticité à 28 jours et après l'essai accéléré par autoclave des mortiers de verre recyclé en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.

Nous remarquons sur la figure V. 12 que les modules d'élasticité à 28 jours et après l'essai accéléré par autoclave des mortiers avec additions minérales varient sensiblement avec la nature minéralogique et la quantité d'additions incorporées dans le mélange. Afin de mieux analyser l'influence des additions minérales sur les modules d'élasticité des mortiers affectés et non affectés, nous avons ramené les modules d'élasticité des mortiers de sable de verre recyclé avec additions minérales à la perte du module d'élasticité, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales (en %), dont :

$$\text{Perte du module d'élasticité} = \frac{E_{28j} - E_{\text{Autoclave}}}{E_{28j}} \times 100 \dots \dots \dots (V. 5)$$

avec :

E 28j : module d'élasticité à 28 jours du mortier avec addition minérale.

E Autoclave : module d'élasticité après autoclavage du mortier avec addition minérale.

La variation des pertes des modules d'élasticité pour les mortiers de sable de verre recyclé avec additions minérales est représentée, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition, sur la figure V. 13.

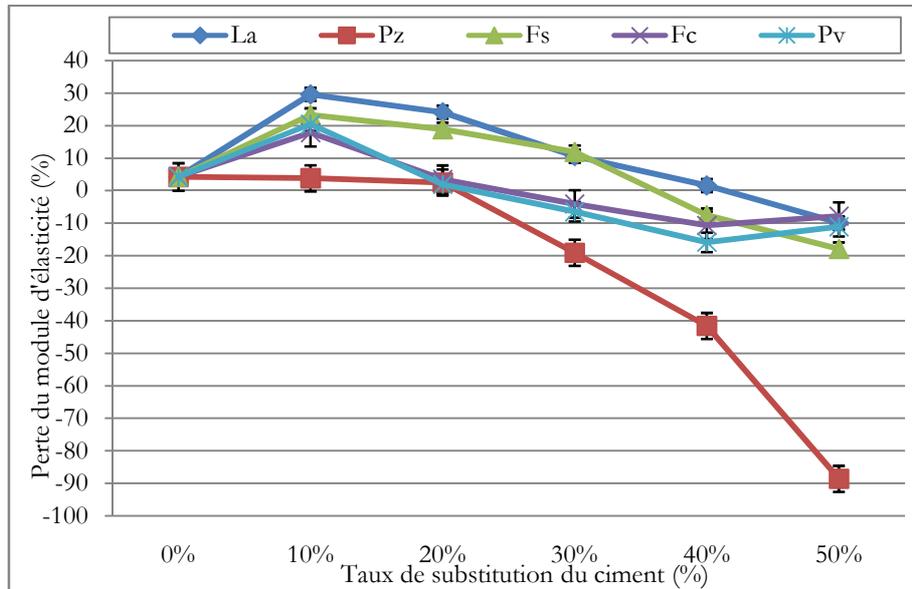


Figure V. 13. Variation des pertes des modules d'élasticité due à la RAS des mortiers de verre recyclé en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition

Nous remarquons sur la figure V. 13, que la RAS entraîne une perte du module d'élasticité observées pour le mortier sans additions minérales (V0 %) de 4 %, cette perte est réduite avec l'incorporation et l'augmentation du taux des additions minérales dans les mélanges, en calculant la moyenne de la perte de la résistance en compression pour les cinq taux de substitution de ciment par chaque addition minérale. On les classe selon l'efficacité à contrer la perte de résistance en compression dans l'ordre croissant suivant : le laitier granulé par 11 %, la fumée de silice par 6 %, le filler calcaire par 0 %, la poudre de verre par -2 %, et finalement la pouzzolane naturelle par -30 %. La pouzzolane naturelle a engendré des gains considérables du module d'élasticité pour des mortiers qui ont présenté une variation dimensionnelle inférieure à 0.15 % (mortiers jugés non-réactifs selon la norme XP P18 - 594). Cette réduction de la perte du module d'élasticité, en particulier et des résistances en générales, est peut être due selon plusieurs auteurs Liu S.H., Xie G.S., et Wang S. [Liu, S.H. et al. 2015] et Lee G., Ling T.C., Wong Y.L., et Poon C.S. [Lee, G. et al. 2011] à la réaction pouzzolanique des additions qui se produit en premier lieu, puis à la consommation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en solution, ce qui conduit à la réduction de la variation dimensionnelle due à la RAS. Pendant ce temps, les hydrates de silicate de calcium (C-S-H) produits par la réaction pouzzolanique des additions se combinent avec une partie des alcalins, ce qui est utile pour réduire les pertes des propriétés mécaniques. Les alcalins des additions libérés dans la solution interstitielle est peu, et beaucoup plus peu que celui du ciment [Xiong, Q. 2006], ce qui signifie que les alcalins libérés par les matériaux cimentaires dans la solution interstitielle diminue avec l'augmentation du taux substitution de ciment par les additions.

V.8. CORRELATION ENTRE LA VARIATION DIMENSIONNELLE ET LA PERTE DES RESISTANCES

La corrélation entre la perte de résistance à la traction et la perte de résistance en compression, pour les mortiers de sable en verre recyclé avec substitution du ciment par les additions minérales, et la corrélation entre la variation dimensionnelle et les pertes des résistances, sont représentées par la figure V. 14 et la figure V. 15, respectivement.

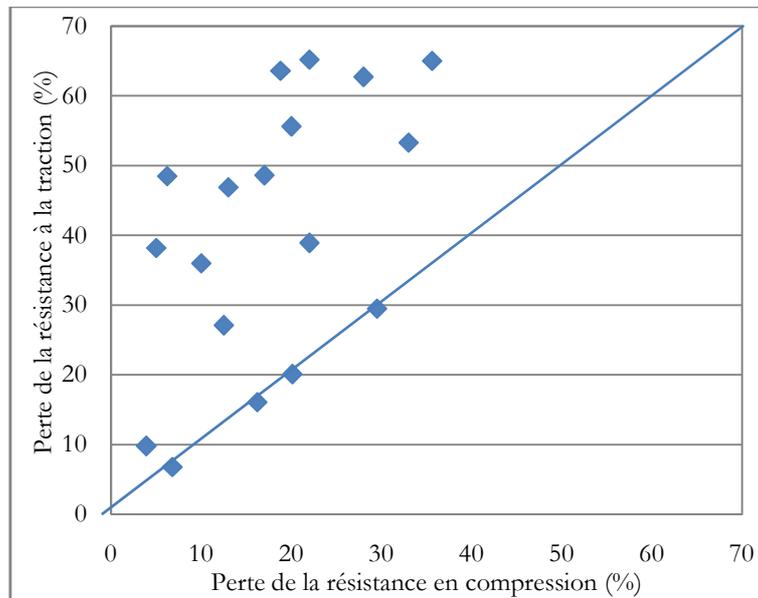


Figure V. 14. Corrélation entre la perte des résistances à la traction et la perte des résistances en compression.

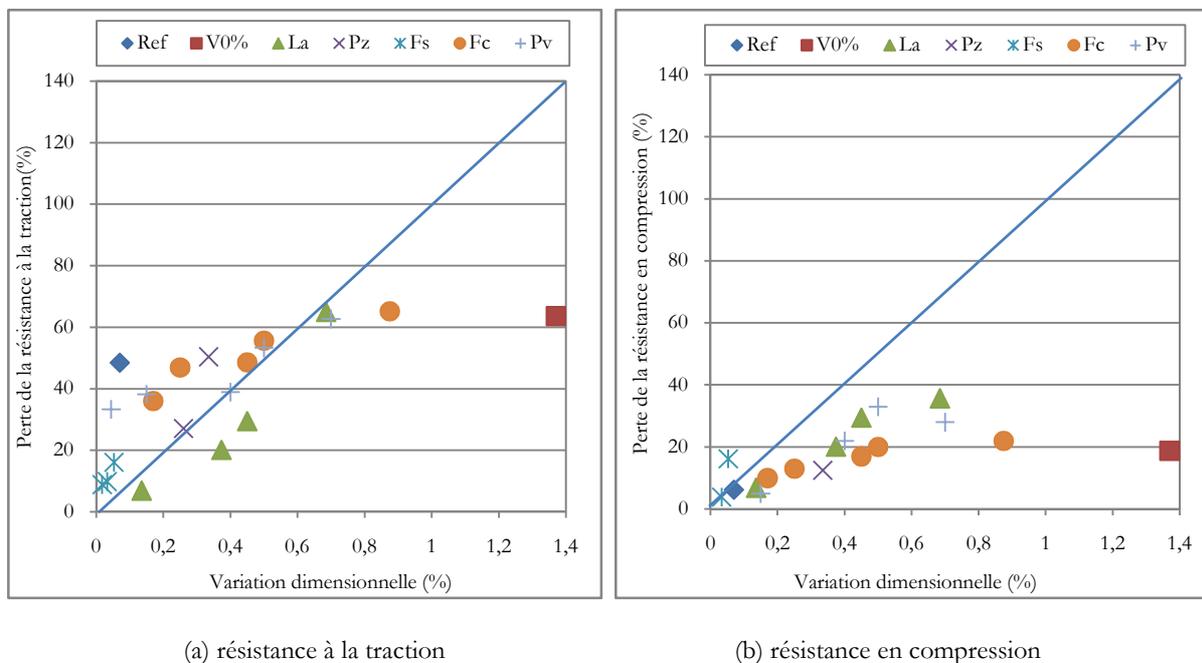


Figure V. 15. Corrélation entre la variation dimensionnelle et la perte des résistances à la traction et en compression.

Nous remarquons sur la figure V. 14 et la figure V. 15, que la perte de la résistance à la traction par flexion est plus importante que la perte de la résistance en compression pour toutes les additions minérales, et l'incorporation des additions minérales a contribué à la réduction de la perte des résistances pour les faibles taux de substitution du ciment par les additions minérales. Les mortiers présentent des pertes importantes des résistances pour des faibles valeurs de variation dimensionnelle, dans le cas de la compression, ces pertes dépassent la perte enregistrée pour le mortier sans additions minérales (V0 %). Les mortiers avec substitution du ciment par de la pouzzolane naturelle (Pz) présentent pour des faibles expansions des gains importants des résistances, plus importants en compression qu'en traction due à l'effet pouzzolanique de cette addition minérale. Les additions minérales utilisés ne possèdent pas eux-mêmes des propriétés liantes, mais ils réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédants des propriétés liantes (des silicates de calcium hydratés C-S-H) semblables à ceux produits par l'hydratation du silicate tricalcique (C_3S) ($C_3A SiO_2$), composé principal du ciment Portland et contribuent à l'amélioration des performances mécaniques.

On peut quantifier la réaction pouzzolanique par la différence entre les résistances des mortiers avec additions minérales et la résistance du mortier sans additions minérales. On remarque que, les mortiers affectés (qui ont subi l'essai accéléré par autoclave) présentent un effet pouzzolanique plus significatif que celui présenté par les mortiers non affectés (qui ont subi une cure sous l'eau durant 28 jours), et ce en traction plus qu'en compression, qui peut être expliqué par l'effet de la température élevée, d'un côté, qui peut engendrer la RAS, développer l'expansion due à la RAS, entraîner une plus grande libération des alcalins dans la solution interstitielle qu'est une condition principale pour déclencher la RAS [Liu, C.X. et al. 2012].

La température affecte de manière significative les effets inhibiteurs des additions sur la RAS. Lorsque le taux de substitution de ciment par l'addition est faible ($< 20\%$), plus la température est élevée, plus le taux d'inhibition est faible. Lorsque le taux de substitution de ciment par l'addition est élevé ($> 30\%$), le résultat s'inverse. Une température plus élevée améliore également la réaction pouzzolanique des additions [Mirzahosseini et Riding 2014].

La réaction pouzzolanique des additions réduira la RAS, qui est présentée par deux réactions mutuellement exclusives. Leur interaction détermine l'intensité de la RAS. Lorsque le taux d'additions est faible, le rôle promotionnel de la température sur la RAS est supérieur à la réaction pouzzolanique. Cependant, c'est le contraire lorsque le taux d'additions est élevé. Ceci est bien similaire au rôle des cendres volantes. Une température élevée améliore la solubilité des cendres volantes, ce qui favorise la réaction pouzzolanique, de sorte qu'elle peut contrôler efficacement la RAS.

V.9. CONCLUSION

Ce chapitre est destiné à poursuivre les investigations sur le rôle préventif des additions minérales sur la réaction alcali-silice (RAS) des mortiers contenant du granulats réactif. Pour atteindre notre objectif, nous avons utilisé deux granulats, un granulats réactif qu'est le verre recyclé (GVR) et un granulats inerte qu'est le calcaire concassé (GCC). Pour confectionner des éprouvettes de mortier enrichies en alcalins, autoclavés pendant 5h à une température de 127 °C et à une pression de 0.15 MPa, selon l'essai accéléré par autoclave (norme NF P 18-590), puis les variations pondérales, dimensionnelles, la fissuration et les variations des performances mécaniques ont été étudiées et les conclusions suivantes sont tirées :

- La RAS a effectivement provoqué une variation dimensionnelle importante de 1.37 % et une variation pondérale importante de 4.45 %. Les additions minérales étudiées peuvent réduire ces variations dimensionnelles et pondérales. Plus leur quantité est importante dans le mélange plus que leur efficacité est meilleure.
- La pouzzolane naturelle (Pz) présente une efficacité à contrer la RAS, meilleure que le laitier granulé (La), les fillers calcaires (Fc) est l'addition la moins efficace à contrer la RAS, même pour le taux de 50 % de substitution du ciment par cette addition.
- Il existe une forte corrélation entre les variations pondérales et les variations dimensionnelles des mortiers affectés par la RAS.
- Aucune fissure n'a été observée pour : les mortiers qui contiennent de la fumée de silice, les mortiers qui contient plus de 30 % de laitier granulé et de la pouzzolane naturelle et les mortiers qui contient plus de 40 % de poudre de verre et de fillers calcaires, ainsi que le mortier de référence.
- La RAS entraîne une perte de résistance à la traction par flexion de 63.5 %, et une perte de résistance en compression de 18.8 %. La variation de perte de la résistance à la traction par flexion est plus importante que celle de la résistance en compression. Les valeurs trouvées correspondent bien avec les résultats obtenus par d'autres auteurs.
- Le remplacement partiel de 10 % à 50 % du volume de ciment par les additions minérales, en général, et la pouzzolane naturelle en particulier, améliore considérablement les performances mécaniques du mortier affectés et contribue à la réduction des pertes.

Finalement, nous avons déduis que la température affecte de manière significative les effets inhibiteurs des additions minérales à contrer les effets néfastes de la réaction alcali silice.

CHAPITRE VI

EFFET DES ADDITIONS
SUR LA R.A.S DES BETONS

CHAPITRE VI

Effet des Additions sur la Réaction Alkali-Silice des Bétons

VI.1	INTRODUCTION	115
VI.2	FORMULATION ET MISE EN ŒUVRE DES BETONS	115
VI.2.1	Dosage en ciment et en alcalins	115
VI.2.2	Dosage en eau et en adjuvant	116
VI.2.3	Nature et quantité de granulats	116
VI.3	EFFET DES ADDITIONS SUR LES PROPRIETES DU BETON FRAIS	117
VI.4	EFFET DES ADDITIONS SUR LES VARIATIONS PONDERALES ET DIMENSIONNELLES DES BETONS AFFECTES	120
VI.4.1	Béton de granulat non-réactif (C0 %)	124
VI.4.2	Béton de granulat réactif sans additions (V0 %)	124
VI.4.3	Bétons avec 10 % d'additions minérales	124
VI.4.4	Bétons avec 20 % d'additions minérales	125
VI.4.5	Bétons avec 30 % d'additions minérales	125
VI.5	EFFET DES ADDITIONS SUR LA FISSURATION DES BETONS AFFECTES	125
VI.6	EFFET DES ADDITIONS SUR LES PERFORMANCES MECANQUES DES BETONS AFFECTES	128
VI.6.1	Effet des additions sur la vitesse des impulsions ultrasonores	128
VI.6.2	Effet des additions sur les résistances des bétons affectés	131
VI.6.3	Facteurs influençants sur les résistances mécaniques	136
VI.6.3.1	Influence de la composition du béton	137
VI.6.3.2	Influence multifactorielle du traitement des bétons	137
VI.7	CONCLUSION	140

Chapitre VI

Effet des Additions Minérales sur la Réaction Alkali-Silice des Bétons

VI. 1. INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent nous avons vérifié l'efficacité d'utilisation des additions minérales en tant que des inhibiteurs des effets néfastes de la réaction alcali-silice (RAS) des mortiers à base de sable de verre recyclé, les additions minérales étudiées ont pu réduire (voire même annuler) les variations dimensionnelles, pondérales, les fissurations et les pertes des performances mécaniques occasionnés par un granulats alcali-réactif dans le mortier sans additions minérales. Cet effet dépend de la quantité et les caractéristiques granulaires de l'addition minérale. L'efficacité des additions minérales à contrer les effets néfastes de la RAS, s'améliore proportionnellement avec l'augmentation de leur taux de substitution du ciment, cependant, l'incorporation des taux supérieures à 30 %, n'améliorent pas les performances mécaniques des mortiers. Ainsi, faut-il trouver un compromis entre les deux contraintes : résistance normative et expansion moindre. La sélection de trois additions minérales telle que : le laitier granulé (La), la pouzzolane naturelle (Pz) et la poudre de verre (Pv) seulement, pour formuler des (mélanges optimaux) et la limitation de taux de substitution à 30 % dans les bétons, se sont avérées des solutions judicieuses.

Dans ce chapitre, le principal objectif est de vérifier, l'effet des additions minérales sur la RAS des bétons, les variations dimensionnelles, pondérales, fissurations et pertes des performances mécaniques, des bétons en granulats de verre recyclé avec différents taux des additions minérales, placés en réacteur selon la norme NF P 18 454 et du fascicule FD P18-456, qui sont suivis et étudiés, même si certaines contraintes pratiques ont nécessité quelques aménagements indispensables.

IV.2. FORMULATION ET MISE EN ŒUVRE DES BETONS

La formulation des bétons a été calculée en fonction de trois principes directeurs :

- a) Formulation s'approchant de celle de chapitre IV ,
- b) Mise en place facile ,
- c) Occurrence certaine de réaction alcali-silice (RAS) dans ces bétons (hormis le témoin).

Ceci nous conduit au processus de formulation suivante :

VI.2.1. Dosage en ciment et en alcalins

La combinaison des exigences des points (a) et (c), nous avons fait adopter un ciment à teneur assez élevée en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{équivalent}}$ (0.8 %) utilisée à un dosage important (400 kg/m^3). Pour satisfaire le

point c) nous avons visé un taux d'alcalins de 6 Kg/m^3 , dont les synthèses de littérature anciennes, nous assurent qu'il provoque à coup sûr des expansions (variations dimensionnelles) dans un béton renfermant un granulat alcali-réactif. Nous avons, pour cela, ajouté de la soude dans l'eau de gâchage. Nous sommes donc allé bien au-delà de la prescription de la norme NF P 18-454 qui recommanderait dans le cas présent un ajout $\delta = 0.9 \text{ kg/m}^3$ de Na_2O ce qui porterait le taux d'alcalins à 4.5 Kg/m^3 seulement. Précisons ici que cette addition de NaOH a été déduite d'un calcul d'un bilan des alcalins actifs. Pour calculer ce bilan, nous avons appliqué la méthode (LCPC 1994), dont le principe est déjà expliqué précédemment.

VI.2.2. Dosage en eau et en adjuvant

Nous avons visé une consistance plastique pour ne pas rencontrer de problème de mise en place dans les moules (point b); pour cela, compte tenu de la dimension maximum des granulats, $D=16 \text{ mm}$, et du caractère concassé des graviers, nous avons adopté un dosage en eau de 200 l/m^3 . Nous avons pris le parti, pour les compositions avec additions minérales qui réduisent la fluidité du béton, d'ajuster la consistance avec un superplastifiant.

VI.2.3. Nature et quantité de granulats

Nous avons utilisé les mêmes granulats testés précédemment avec les mortiers, un granulat réactif qu'est le verre à vitre recyclé (GVR) et un granulat inerte de type calcaire concassé (GCC), aux quels nous avons incorporé en substitution progressive de 0 % à 30 % en volume de ciment par les trois additions minérales, laitier granulé (La), pouzzolane naturelle (Pz) et poudre de verre (Pv), ceci nous a donné les appellations et les compositions présentées par le tableau VI. 1 et le tableau VI. 2, respectivement.

Tableau VI. 1. Appellations des différents mélanges de béton

N°	Granulats		Additions minérales			%				Appellations
	GCC	GVR	La	Pz	Pv	0	10	20	30	
01	x					x				C. 0%
02		x				x				V. 0%
03		x	x				x			V. La.10%
04		x	x					x		V. La.20%
05		x	x						x	V. La.30%
06		x		x			x			V. Pz.10%
07		x		x				x		V. Pz.20%
08		x		x					x	V. Pz.30%
09		x			x		x			V. Pv.10%
10		x			x			x		V. Pv.20%
11		x			x				x	V. Pv.30%

Tableau VI. 2. Composition de 1 m³ des différents types de béton

	Ciment (kg)	Eau (l)	E/C	Super Plastifiant (g)	Additions minérales (g)			Sable (Kg)	Gravier (Kg)	NaOH (Kg)	Slump (cm)
					La	Pz	Pv				
C.0%	400	204	0.5	1.20	0	0	0	711.32	1079.14	12.85	7
V.0%	400	204	0.5	0.90	0	0	0	724.36	1098.92	12.85	7
V.La10%	360	204	0.5	0.70	435.50	0	0	724.36	1098.92	13.02	7
V.La20%	320	204	0.5	1.00	870.30	0	0	724.36	1098.92	13.21	7
V.La30%	280	204	0.5	1.40	1320.3	0	0	724.36	1098.92	13.40	7
V.Pz10%	360	204	0.5	0.40	0	340.50	0	724.36	1098.92	13.11	7
V.Pz20%	320	204	0.5	0.50	0	785.90	0	724.36	1098.92	13.37	7
V.Pz30%	280	204	0.5	0.90	0	1205.0	0	724.36	1098.92	13.65	7
V.Pv10%	360	204	0.5	0.70	0	0	345.20	724.36	1098.92	12.76	7
V.Pv20%	320	204	0.5	0.90	0	0	560.00	724.36	1098.92	12.91	7
V.Pv30%	280	204	0.5	1.20	0	0	1150.2	724.36	1098.92	13.69	7

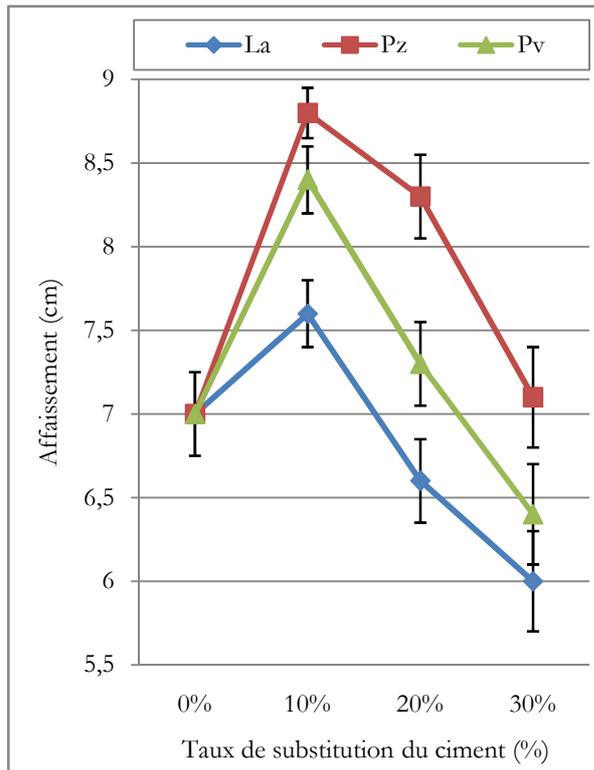
Le tracé de la courbe de référence pour le calcul des proportions de sable et de gravier a été fait suivant la méthode de Dreux Gorisse. L'ajustement des courbes granulaires du combiné sable + gravier des bétons sans additions minérales (C0 %) et (V0 %) à la courbe de référence sont représentées en chapitre IV. Les procédures suivies pour la préparation des bétons, la confection et le stockage des éprouvettes, ont été réalisées conformément aux procédures décrites dans le chapitre II, les bétons ont été mis dans des moules 7 x 7 x 28 menu par des plots de retrait afin de mesurer les variations dimensionnelles, les éprouvettes de béton ont été conservés au réacteur à 60 °C et 100 % HR, suivant les procédures de la norme NF P 18 454 décrites au chapitre II, les essais de résistance sont effectués sur les mêmes éprouvettes, selon les échéances suivantes : 28 jours, 3, 6 et 9 mois.

VI.3. EFFET DES ADDITIONS SUR LES PROPRIETES DU BETON FRAIS

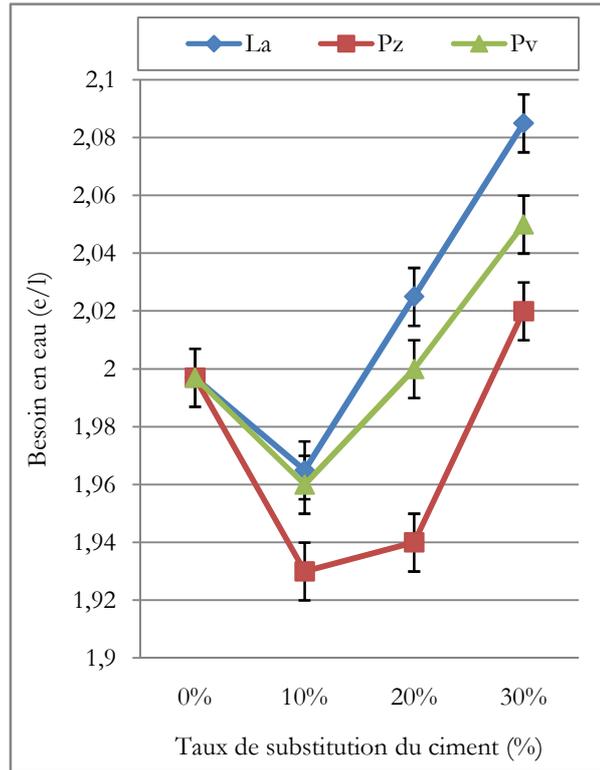
Pour étudier l'effet des additions minérales sur les propriétés des bétons frais, nous avons fabriqué les bétons premièrement avec une quantité d'eau déminéralisée fixe, afin de déterminer l'effet des additions minérales sur l'ouvrabilité (mesuré par l'affaissement au cône d'Abrams conformément à la norme NF P 18-451) présenté par la figure VI. 1-a. Puis la quantité d'eau a été ajustée peu à peu jusqu'à l'obtention d'une ouvrabilité de référence (un affaissement au cône d'Abrams de 7 cm), afin de déterminer l'effet des additions minérales sur le besoin en eau présenté par la figure VI. 1-b.

Après remplissage et serrage des moules, nous avons mesuré la masse des bétons frais pour calculer les masses volumiques apparentes et la compacité des bétons à l'état frais, la compacité est exprimée en (%), est représentée en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales, à la figure VI. 1-c.

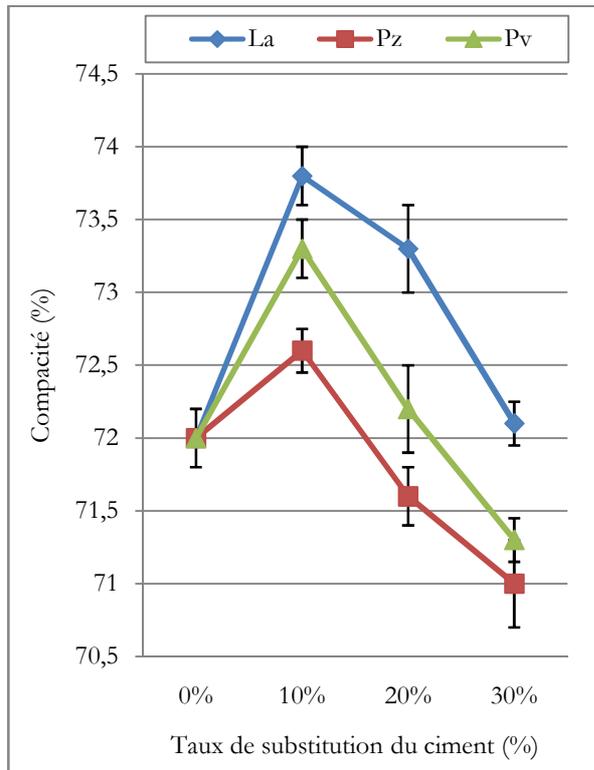
Pour déterminer l'effet des additions sur le besoin en adjuvants, représenté en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales, à la figure VI. 1-d, nous avons utilisé un superplastifiant lors de la fabrication des bétons, le superplastifiant a été ajouté peu à peu afin d'obtenir l'ouvrabilité de référence pour chaque béton.



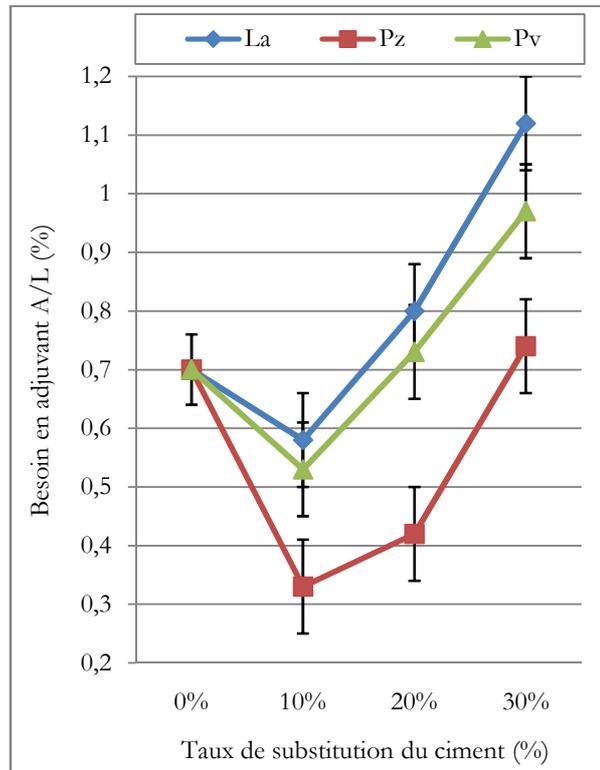
(a) Affaissement



(b) Besoin en eau



(c) Compacité



(d) Besoin en adjuvant

Figure VI. 1. Effet des additions minérales sur les propriétés des bétons frais.

Nous pouvons constater que l'effet des additions minérales sur les propriétés des bétons frais varie sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires (morphologie) et la quantité de l'addition minérale incorporée dans le mélange.

Nous remarquons que l'affaissement du béton frais avec les additions minérales augmente jusqu'à 10 % du taux de substitution du ciment par l'addition, puis décroît avec l'augmentation de la quantité d'additions dans le mélange. Ceci montre, que l'incorporation de ces additions dans les bétons à faibles taux de substitution du ciment, améliore la plasticité des bétons, qui deviennent plus fermes à plus forts taux de substitution.

Les bétons avec les additions minérales présentent un besoin en eau plus faibles que celui des bétons de référence pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 10 %. Ceci indique une optimisation du squelette granulaire de la matrice cimentaire pour les bétons avec ces additions minérales à faibles taux de substitution du ciment. Les particules de l'addition remplissent une partie de la porosité inter-granulaire du squelette solide et libèrent 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 qui se trouve réduite. À plus forts taux de substitution du ciment par ces additions, le besoin en eau croît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange, mais diffère d'une addition à une autre. Pour la pouzzolane naturelle (Pz), il reste pratiquement inférieur à celui du béton de référence, avec un léger dépassement à 30 % du taux de substitution du ciment. Pour le laitier granulé (La) et la poudre de verre (Pv) le besoin en eau croît avec le taux de substitution du ciment, à partir de 10 % du taux de substitution du ciment par les additions. Il en résulte donc que pour les faibles taux de substitution de ciment par les additions minérales utilisées, le besoin en eau des bétons avec additions est directement liée aux phénomènes de l'empilement granulaire, et donc à la compacité des mélanges à l'état frais, alors qu'à plus forts taux de substitution du ciment, les particules des additions deviennent plus sensibles aux forces inter-particulaires et aux tensions superficielles de la phase liquide. Ce comportement est peu influencé par la nature du granulat.

Nous remarquons que la compacité des bétons frais avec additions minérales reste comparable à celle de béton de référence. La compacité des bétons frais avec la pouzzolane naturelle (Pz) est la plus décroissante en raison de l'influence des forces inter-particulaires et aux tensions superficielles de la phase liquide. Nous remarquons que le besoin en adjuvant des bétons avec additions minérales, pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 10 % est plus faible que celui des bétons de référence (C0 %) et (V0 %), ce comportement confirme l'optimisation du squelette granulaire de la matrice cimentaire pour les bétons avec ces additions minérales à faibles taux de substitution du ciment. A plus forts taux de substitution du ciment par ces additions, le besoin en adjuvant croît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange, mais diffère d'une addition à une autre, le besoin en adjuvant est plus important pour les bétons avec le laitier granulé (La), que pour les bétons avec la poudre de verre (Pv), ou avec la pouzzolane naturelle (Pz).

VI.4. EFFET DES ADDITIONS SUR LES VARIATIONS PONDERALES ET DIMENSIONNELLES DES BETONS AFFECTES

Nous avons appliqué aux éprouvettes de béton, dès leur démoulage, les procédures de mesures et de conservation telles que les définit la norme NF P 18 454 (rappelées au chapitre II). Les éprouvettes (7 x 7 x 28) des bétons ont été traitées au réacteur à 60 °C et 100 % HR durant deux ans (96 semaines) dont les mesures ont été effectuées une fois chaque deux semaines durant trois mois, puis une fois chaque quatre semaines. Les variations pondérales et dimensionnelles mesurées sont traduits par la figure VI. 2 et la figure VI. 3, respectivement. La figure VI. 4 présente la réduction des variations dimensionnelles des bétons par les additions minérales et la figure VI. 5 présente une corrélation entre les variations dimensionnelles et les variations pondérales, les valeurs correspondent à la moyenne des mesures sur trois éprouvettes.

- Pour les variations pondérales, on observe que les absorptions d'eau des bétons varient dans le même sens que les variations dimensionnelles : elles sont d'autant plus importantes que les variations dimensionnelles sont élevées. Ce fait, qui montre bien le rôle joué par l'eau de l'ambiance environnemental dans la RAS aussi bien comme réactif que comme milieu réactionnel [Larive. C., 1997].

- Le suivi des variations dimensionnelles a été poursuivi jusqu'à 24 mois, donc bien au-delà des échéances réglementaires de 5 et 12 mois aux termes desquelles, suivant les prescriptions du fascicule FD P18-456. La formulation est déclarée réactive ou non : les seuils étant de 0.02 et 0.03 % respectivement. Cet allongement de l'expérimentation permet de déterminer la cinétique du phénomène de gonflement jusqu'à son achèvement. Il permet de répondre à la question souvent posée par de nombreux auteurs à propos de l'activité préventive des additions minérales : s'agit-il d'une réduction (voire d'une suppression) du gonflement ou bien d'un retard dans sa manifestation ? (voir figure VI. 6).

- On observe que les courbes de variation dimensionnelle traduisent des cinétiques extrêmement variables. Si nous choisissons comme critère de classement le temps $t_{0,8}$ au bout duquel l'expansion a atteint 80 % de la valeur finale.

Tableau VI. 3. Temps nécessaire pour atteindre 80 % de l'expansion finale.

Béton	V	V. La			V. Pz			V. Pv			C
% addition	0%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	.30%	0%
$t_{0,8}$ (semaine)	20	56	72	76	20	36	60	60	64	68	37

L'allure de la courbe représentative du variation dimensionnelle (gonflement libre) en fonction du temps, dans le cas de nos essais, est tracée sur la figure VI. 7, sa forme est en bon accord avec les courbes expérimentales obtenues sur des prismes de béton par Pleau, R., Bérubé, M.A., Pigeon, M., Fournier, B. et Raphael, S., [Pleau. R et al. 1989], Shayan et Ivanusec [Shayan. A., et Ivanusec. I., 1989], Bollote. B [Bollote. B., 1992], Wang et Gillott [Wang. H., et Gillott. J.E., 1991], Rigden S. R., Majlesi Y., et Burley E., [Rigden. S.R., et al. 1995], Larive C, Laplaud A., et Joly M., [Larive. C et al. 1996] et beaucoup d'autres. Pour notre type d'éprouvettes, nous verrons que l'on retrouve également l'allure de cette courbe, mais seulement à partir d'un certain stade. En fait, le démarrage n'est généralement pas aussi linéaire (temps de latence avant l'accélération des gonflements), mais

il est important de remarquer qu'au moins la dernière partie des courbes de gonflement peut être décrite par deux paramètres seulement : le temps caractéristique τ et le gonflement asymptotique ϵ_{∞} . L'analyse des courbes expérimentales est ajustée à un modèle mathématique de Larive. C [Larive. C., 1997] grâce à laquelle sont déterminés les paramètres caractéristiques pour les différents types des bétons formulés : ϵ , τ , V_{max} , indiqués dans le tableau VI. 4.

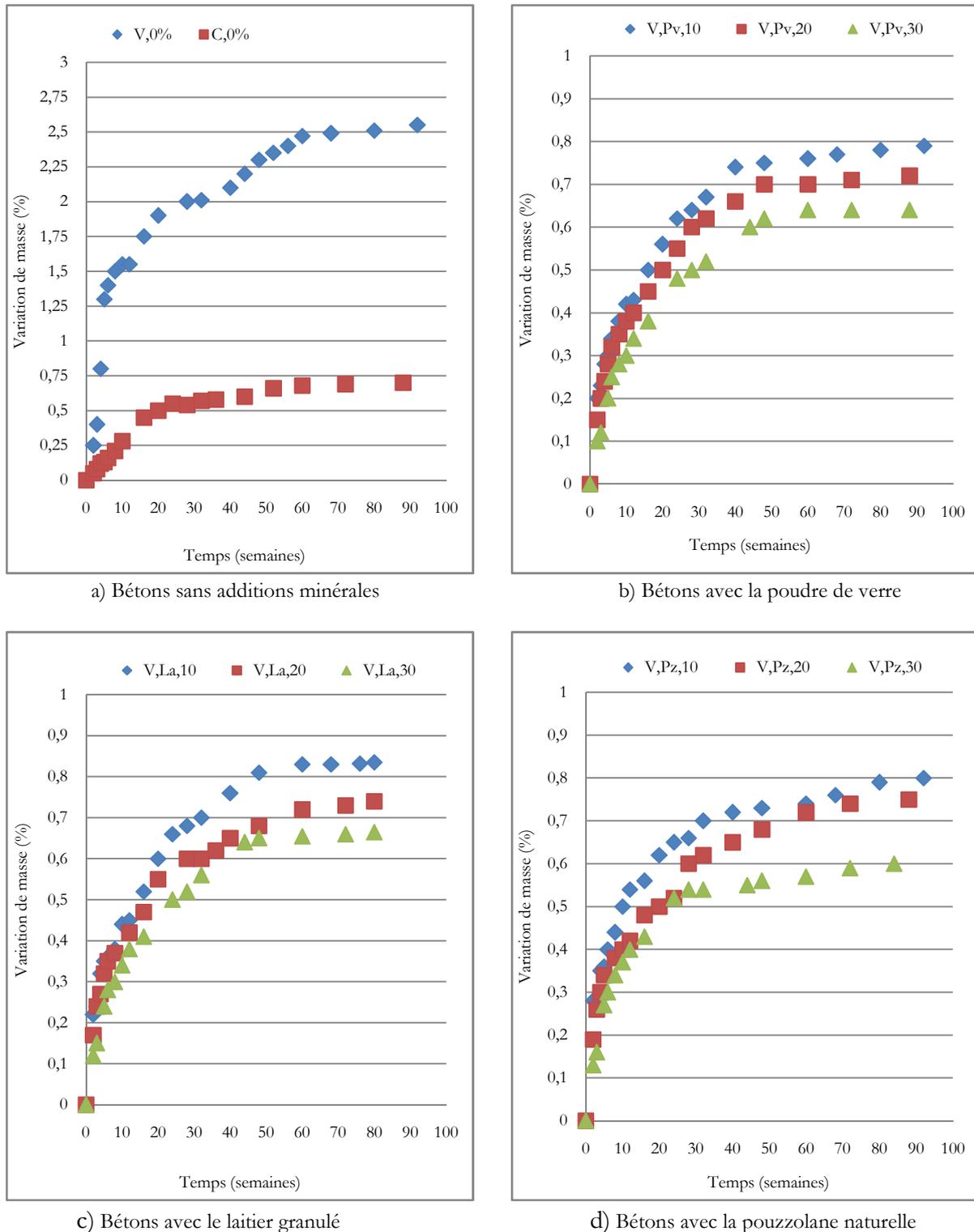
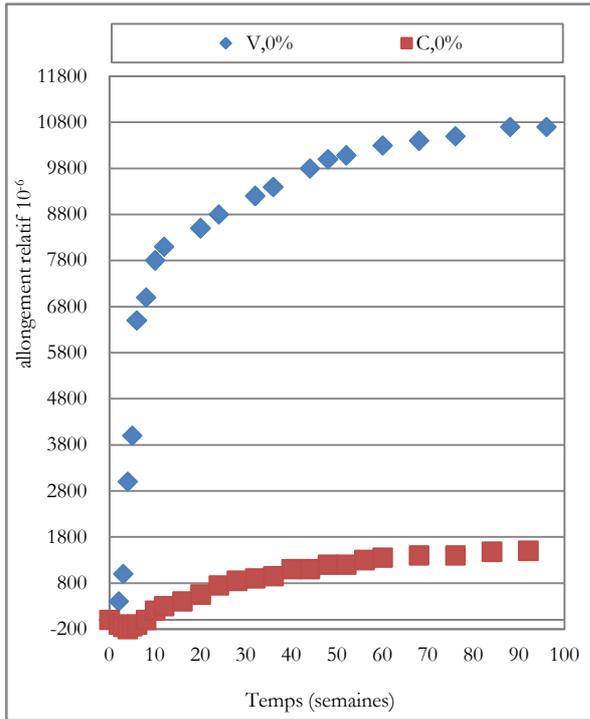
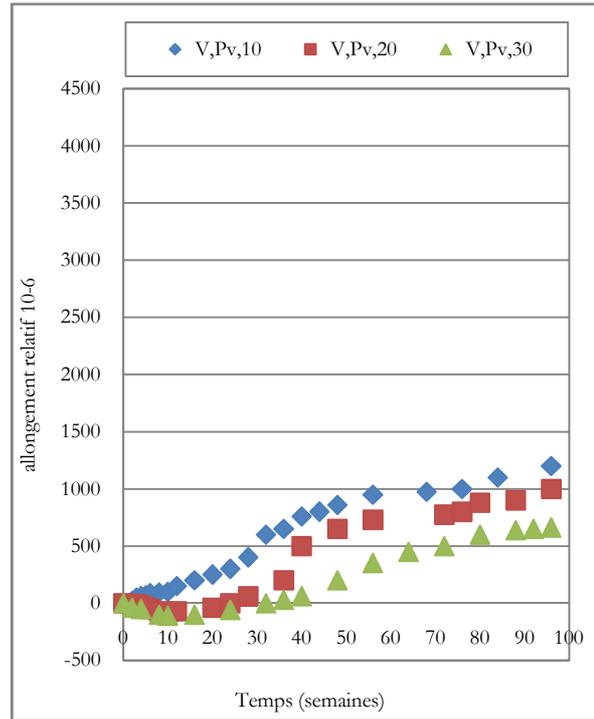


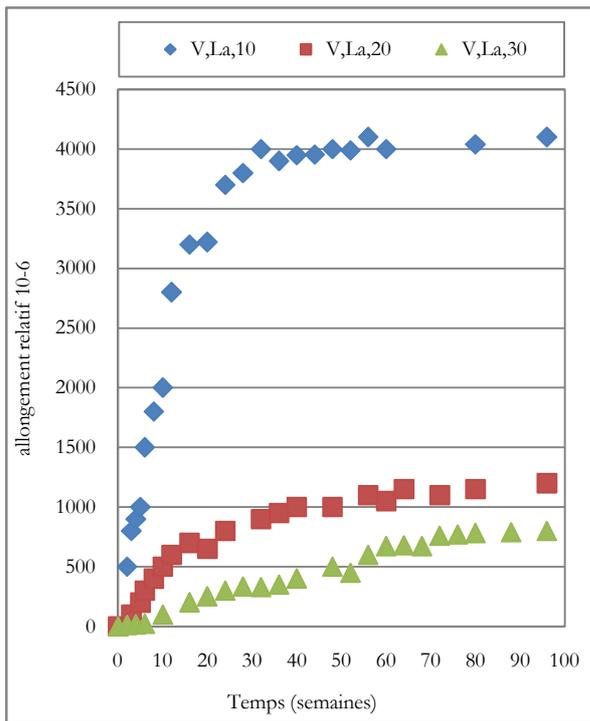
Figure VI. 2. Variations pondérales des éprouvettes de béton, en fonction du temps.



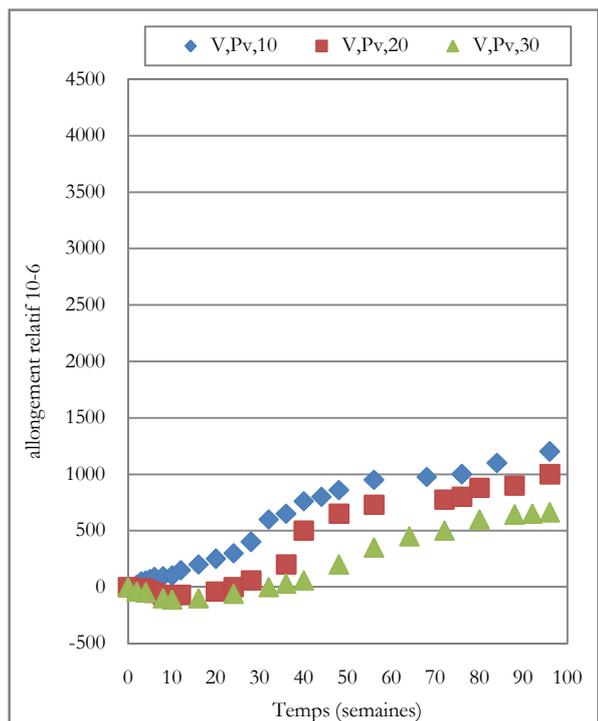
a) Bétons sans additions minérales



b) Bétons avec la poudre de verre



c) Bétons avec le laitier granulé



d) Bétons avec la pouzzolane naturelle

Figure VI. 3. Variations dimensionnelles des éprouvettes de béton, en fonction du temps.

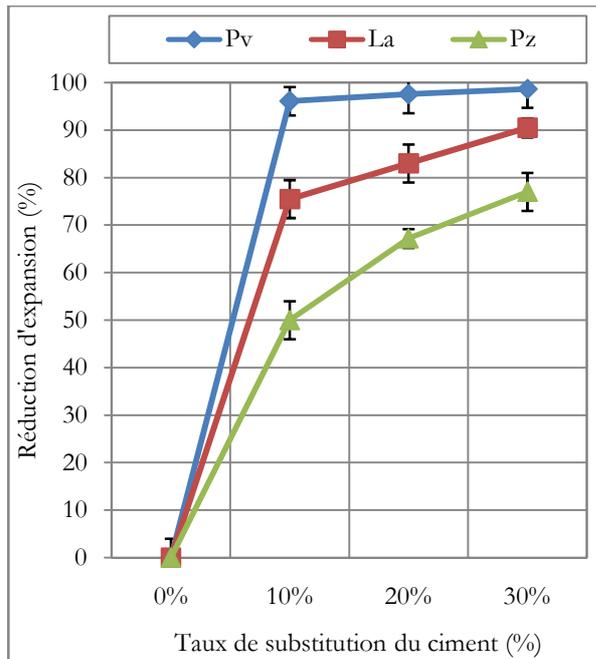


Figure VI. 4. Réduction des variations dimensionnelles par les additions minérales.

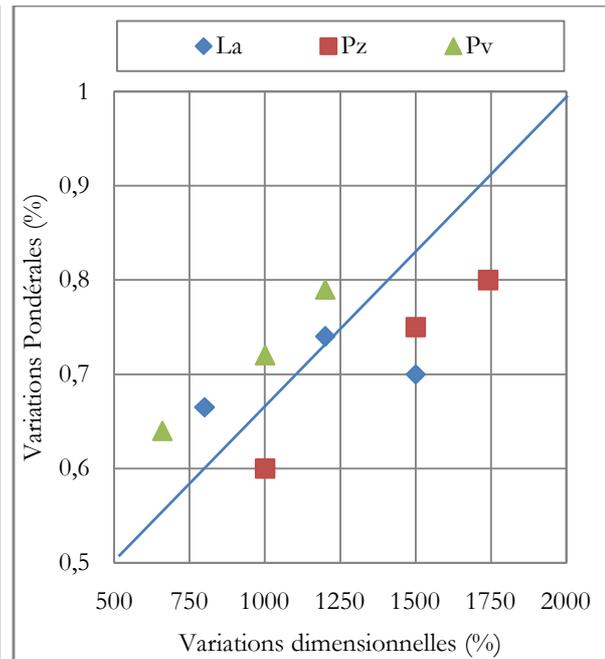


Figure VI. 5. Corrélation entre les variations dimensionnelles et les variations pondérales des bétons

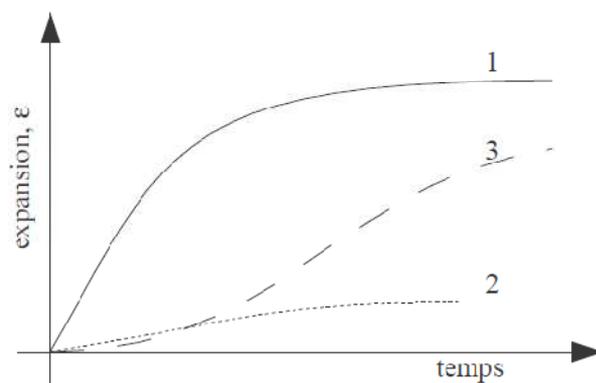


Figure VI. 6. Activité préventive des additions minérales sur l'expansion de la RAS (1) gonflement d'un béton réactif (2) actions de réduction (3) ou de retard

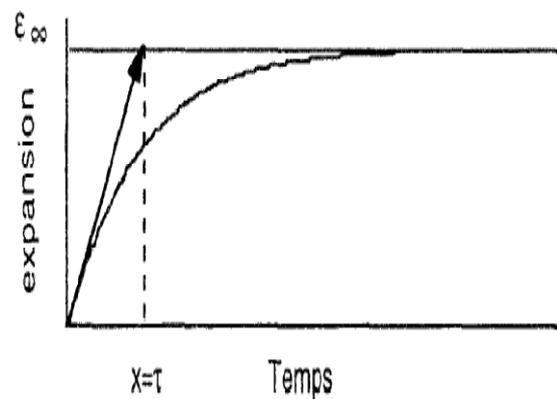


Figure VI. 7. Allure des courbes de variation dimensionnelle

Tableau VI. 4. Valeurs caractéristiques des courbes d'expansion des bétons

Bétons		$\epsilon_{\infty} \cdot 10^{-6}$	τ_1 , semaines	τ_c , semaines	$V_{max} \cdot 10^{-6} / \text{semaines}$
C.0 %		160	19	9	8
V.0 %		11000	3	2.7	1025
V.La	10 %	972	4.4	1.8	146
	20 %	198	0	1.4	42
	30 %	124	45	7.9	35
V.Pz	10 %	950	3.9	1.2	140
	20 %	200	0	1.4	42
	30 %	190	43	7.6	32
V.Pv	10 %	965	4.2	1.6	144
	20 %	190	49.7	7.8	33
	30 %	120	40	7.2	30

Après examen des courbes expérimentales des variations dimensionnelles, on peut formuler les observations ci-après :

VI.4.1. Béton de granulats non-réactif (C0 %)

Nous rappelons que ces granulats, de nature calcaire, ont été choisis pour élaborer un béton de référence, non-réactif aux alcalins, nous avons pu confirmer que ce matériau est classé non réactif par l'essai accéléré à l'autoclave sur mortier (Chapitre V). L'analyse de la courbe de la variation dimensionnelle du béton (C0 %) amène aux conclusions suivantes :

- Au regard du fascicule d'application FD P 18-456 la variation dimensionnelle du béton (C0%) est inférieure à la valeur-limite de $200 \mu\text{m}/\text{m}$ à 3 mois qui marque le passage aux formules qualifiées réactives. Il y a donc à ce niveau, concordance avec le classement "non-réactif" des granulats obtenu par l'essai à l'autoclave.
- La vitesse de la variation dimensionnelle (expansion) est très faible (7.10^{-6} /semaine) durant plusieurs mois de sorte que le palier élevé de 160.10^{-6} n'est atteint qu'au bout de 48 semaines environs.

VI.4.2. Béton de granulats réactifs sans additions (V0 %)

On remarque à l'observation des courbes expérimentales que le granulats de verre recyclé confère aux bétons, une cinétique d'expansion extrêmement rapide, puisque le palier d'expansion est atteint approximativement en 8 semaines. La caractéristique essentielle de granulats de verre, à savoir qu'il provoque une expansion qui est de 4 à 6 fois plus grande que celles imputables aux autres granulats réactifs ; Moisson. M [Moisson. M., 2005] a été montré par la courbe expérimentale (a). Les valeurs de gonflement mesurées par le granulats de verre sont très importantes, sa courbe d'expansion présente une pente finale non nulle, ce type de comportement a été observé par Larive. C [Larive. C., 1997] et Carles-G.A. et Cyr. M. [Carles-G.A. et Cyr. M. 2002]. Pour rendre compte de l'interprétation de courbes d'expansion à long terme (au-delà de 1 an) des valeurs de cette pente comprise entre 0.4 et 6.10^{-6} / semaine a été trouvée. Dans le cas du béton (V0 %) la pente terminale est de 30.10^{-6} /semaine, soit approximativement 5 fois plus forte. Peut-on, dès lors, penser que cette pente n'est pas, en partie du moins, imputable à une poursuite tardive de la RAS ?

VI.4.3. Bétons avec 10 % d'additions minérales

Le taux de 10 % de substitution de ciment par les additions de laitier granulé (La), de pouzzolane naturelle (Pz) et de poudre de verre (Pv) réduit de 40 % l'expansion finale, mesuré à 96 semaines, mais comme il faut tenir compte du fait que la pente de la courbe n'est pas nulle aux longues échéances. Nous observons que leur activité est faible, cette faiblesse est essentiellement due à une baisse importante de la vitesse d'expansion (-53 %) concurremment à un léger allongement de la durée totale de la réaction.

Sur le plan normatif l'incorporation de 10 % de laitier granulé (La), de pouzzolane naturelle (Pz) et de poudre de verre (Pv) en substitution volumique de ciment dans le béton de granulats de verre recyclé ne permet pas de requalifier celui-ci comme non-réactif.

VI.4.4. Bétons avec 20 % d'additions minérales

L'activité des additions minérales en remplacement partiel de 20 % de volume de ciment est remarquablement élevée : elle se manifeste très rapidement et se maintient ensuite à un niveau de réduction de l'expansion proche de 80 %, il en résulte que, sur le plan réglementaire, les formulations avec l'incorporation de 20 % des additions minérales sont classées acceptables par la norme NF P 18-454 et le fascicule FD P 18-456. Par ailleurs le fait que, au delà de 20 semaines et jusqu'à la dernière échéance de mesure soit 76 semaines, on observe un palier est probablement le gage du caractère définitif de la protection assurée par les additions minérales.

VI.4.5. Bétons avec 30 % d'additions minérales

On constate que 30 % de remplacement du volume de ciment par les additions minérales réduisent très fortement (-90 %) l'expansion finale. Par ailleurs, on notera qu'elles allongent sensiblement la période de latence alors que le temps caractéristique est diminué. Les additions minérales agissent également sur la vitesse maximum d'expansion qu'est divisée par quatre.

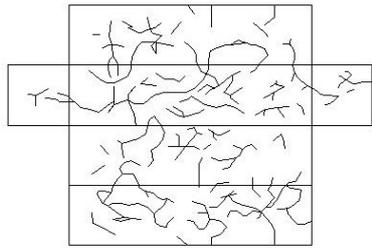
Le résultat est beaucoup moins satisfaisant pour la poudre de verre (Pv), pour ce dernier la difficulté essentielle vient du fait que durant les 28 premières semaines ce béton manifeste un retrait global. Une façon de tourner la difficulté consisterait à considérer comme origine des temps non pas la date de la première mesure, mais la date à laquelle la variation dimensionnelle est nulle (le passage du retrait à l'expansion et la vitesse d'expansion devient positifs). Donc, pour la poudre de verre (Pv) la très forte réduction de l'expansion globale est un fait acquis.

On peut affirmer que les additions minérales se comportent comme un véritable réducteur d'expansion (dans les conditions expérimentales de laboratoire). Par rapport aux exigences de la norme NF P 18-454 et du fascicule FD P18-456, l'introduction de ces additions dans le béton de verre recyclé rend cette formulation acceptable puisque l'expansion au terme des 21 semaines est inférieure au plafond de 200.10^{-6} .

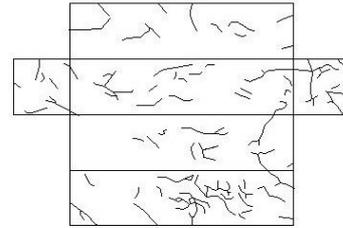
VI.5. EFFET DES ADDITIONS SUR LA FISSURATION DES BETONS AFFECTES

Les effets délétères de la RAS dans un béton ne se traduisent pas uniquement sous forme d'une variation pondérale ou dimensionnelle du béton : la plupart du temps apparaît également une fissuration superficielle, plus ou moins dense, par laquelle peuvent se manifester (ou non) des exsudations de gel.

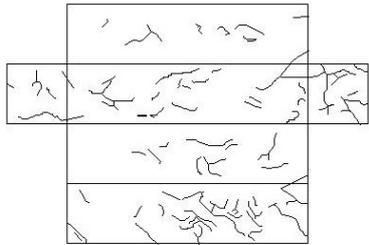
Nous avons photographié les éprouvettes de béton (puis nous avons utilisé un logiciel de dessin pour développer une cartographie des fissures sur les six faces de chaque éprouvette). Ensuite, les mesures de la largeur et la densité des fissures ont été relevées à l'aide d'une lunette micrométrique pour la détection des fissures ayant un grossissement de 24 x et réticule 4 mm/0.02. Les mesures ont été évaluées sur 15 points pour chaque éprouvette de béton afin d'obtenir des valeurs moyennes pertinentes. La largeur et la densité des fissures mesurées sont présentées par la figure VI. 8 et le tableau VI. 5.



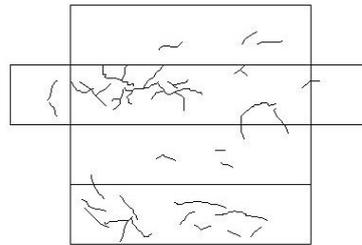
a- Fissuration de surface de l'éprouvette de béton (V.0%)



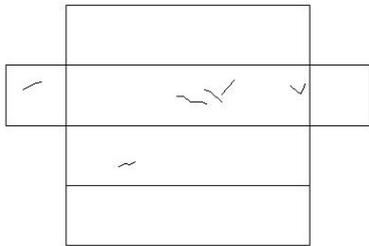
b- Fissuration de surface de l'éprouvette de béton (V.La.10%)



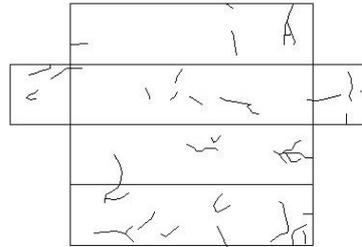
c- Fissuration de surface de l'éprouvette de béton (V.Pz.10%)



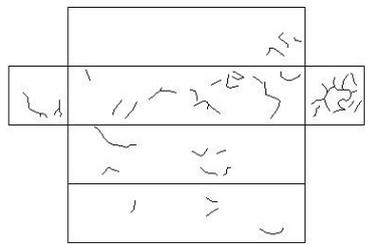
d- Fissuration de surface de l'éprouvette de béton (V.Pv.10%)



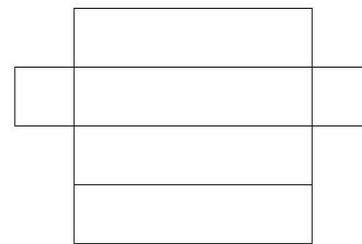
e- Fissuration de surface de l'éprouvette de béton (V.La.20%)



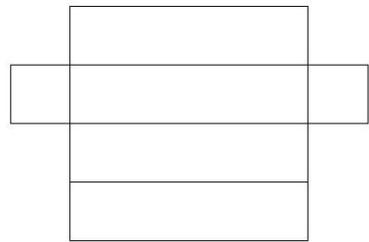
f- Fissuration de surface de l'éprouvette de béton (V.Pz.20%)



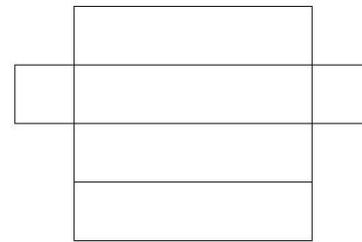
j- Fissuration de surface de l'éprouvette de béton (V.Pv.20%)



h- Fissuration de surface de l'éprouvette de béton (V.La.30%)



i- Fissuration de surface de l'éprouvette de béton (V.Pz.30%) et (V.Pv.30%)



g- Fissuration de surface de l'éprouvette de béton (C.0%)

Figure VI. 8. Fissuration de surface des différentes éprouvettes de béton.

Tableau VI. 5. Largeur et densité de fissuration des différents bétons.

Taux de substitution de ciment			0 %	10 %	20 %	30 %	Moyenne horizontale	
Granulat non réactif	LF	mm	0.00	-	-	-	0.00	
	DF	mm/cm ²	0.00	-	-	-	0.00	
Granulat réactif	LF	mm	0.90	-	-	-	0.90	
	DF	mm/cm ²	10.938	-	-	-	10.938	
Poudre de verre	LF	mm	-	0.300	0.10	0.00	0.133	
	DF	mm/cm ²	-	4.125	1.250	0.00	1.792	
Laitier granulé	LF	mm	-	0.16	0.08	0.00	0.080	
	DF	mm/cm ²	-	3.150	3.200	0.00	2.117	
Pouzzolane naturelle	LF	mm	-	0.034	0.00	0.00	0.011	
	DF	mm/cm ²	-	2.255	0.00	0.00	0.752	
Moyenne verticale	LF	mm	0.900	0.165	0.06	0.00		
	DF	mm/cm ²	10.938	3.168	1.483	0.00		
			LF : Largeur de fissure (mm)					
			DF : Densité de fissure (mm/cm ²)					

On remarque qu'aucune fissure n'a été observée sur les éprouvettes du béton de référence (C0 %). Tous les bétons qui contiennent 30 % des additions minérales et le béton qui contient 20 % de la pouzzolane naturelle (Pz). Pour les autres bétons, la largeur et la densité des fissures sont relativement variables, les fissures apparues sur les éprouvettes du béton en granulat réactif sans additions minérales (V0 %) sont les plus larges et denses. Concernant l'action des additions minérales, on constate que l'incorporation de taux de 20 % de la pouzzolane naturelle supprime les fissures superficielles visibles, le laitier granulé et la poudre de verre n'annulent pas la fissuration que pour des taux supérieurs à 30 % de substitution volumique de ciment.

La figure VI. 9 présente une corrélation entre la variation dimensionnelle et la fissuration des éprouvettes des bétons.

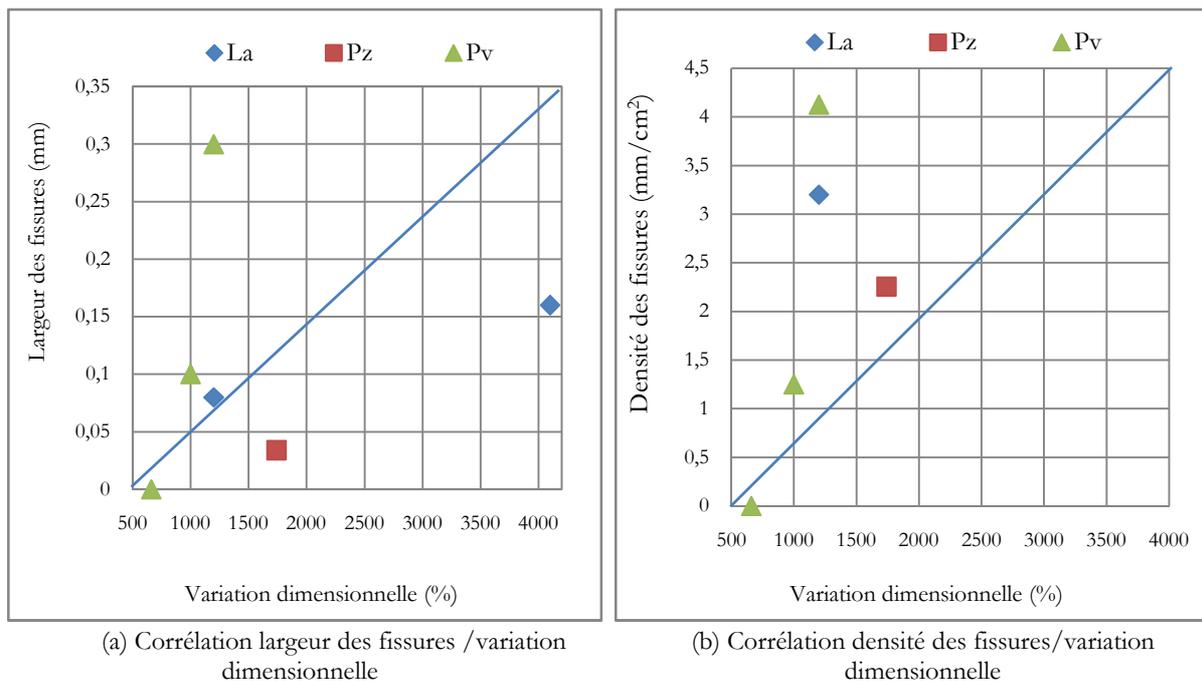


Figure VI. 9. Corrélation fissuration/variation dimensionnelle des bétons.

On constate que la largeur et la densité des fissures ne varient pas simultanément avec les valeurs de la variation dimensionnelle finale des éprouvettes de béton conservées durant 24 mois à 60 °C et 100 % HR. Les points expérimentaux des mesures sont plus au moins du côté de l'axe des fissurations que de l'axe des variations dimensionnelles. Ceci montre, que la largeur et la densité des fissures des éprouvettes de béton sont légèrement plus importantes que leur variations dimensionnelle finale, contrairement aux mortiers autoclavés durant 5 heures où nous avons remarquer une forte corrélation entre la largeur et la densité des fissures et les variations dimensionnelles. Ceci peut être dû au lien étroit entre la pâte (addition/ciment) et les graviers de béton. On peut noter que les fissures effectuées par la RAS ont été remplies de produit d'hydratation ou de gel de la RAS dû à l'effet de la température et l'hydratation contenue.

VI. 6 EFFET DES ADDITIONS SUR LES PERFORMANCES MECANIQUES DES BETONS AFFECTES

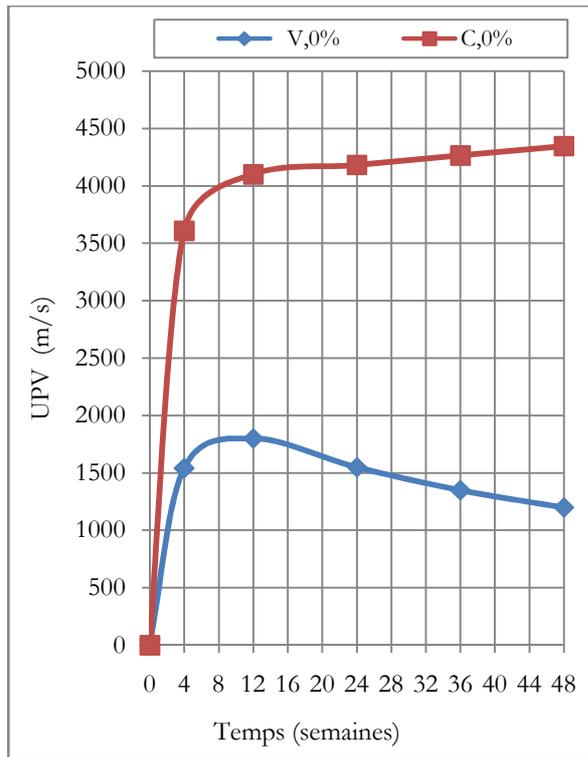
Après les mesures des variations pondérales et dimensionnelles, le levé des largeurs et densité de fissuration, les éprouvettes de béton a été soumis à des essais mécaniques. Nous avons mesuré la vitesse des impulsions ultrasonores, la résistance à la traction par flexion 3 points et la résistance en compression. La littérature sur ce sujet est très abondante, mais elle fournit des résultats extrêmement variés. Vu la disparité et les nombreuses contradictions des résultats de la littérature, il nous a semblé important de tester les performances mécaniques des éprouvettes que nous avons utilisé pour les autres essais. Les modes opératoires ont été présentés dans le chapitre II. Il nous a donc paru important de réaliser un suivi dans le temps des caractéristiques mécaniques de nos éprouvettes, ceci constitue un ensemble de données aussi complet que possible et, par ailleurs, le grand nombre d'échantillons nécessaires à ces essais destructifs permet une analyse plus approfondie des autres paramètres de cette expérimentation.

Quatre séries des éprouvettes de béton (7 x 7 x 28) ont été testées, à différent âge : 28 jours, 3 mois, 6 mois et aussi à 9 mois, (éprouvettes ayant pratiquement achevé de gonfler). Chaque série contient 11 formulations de béton, pour chaque formulation, nous avons testé 03 éprouvettes, ce qui a entraîné 132 mesures de la vitesse des impulsions ultrasonores, 132 essais de traction par flexion, après la rupture des éprouvettes sous charge de traction par flexion, on obtient deux moitiés des éprouvettes chacune a été découpée par sciage sous forme d'un cube de 7 cm d'arête qui ont ensuite été testés en compression, ce qui a donné 264 éprouvettes.

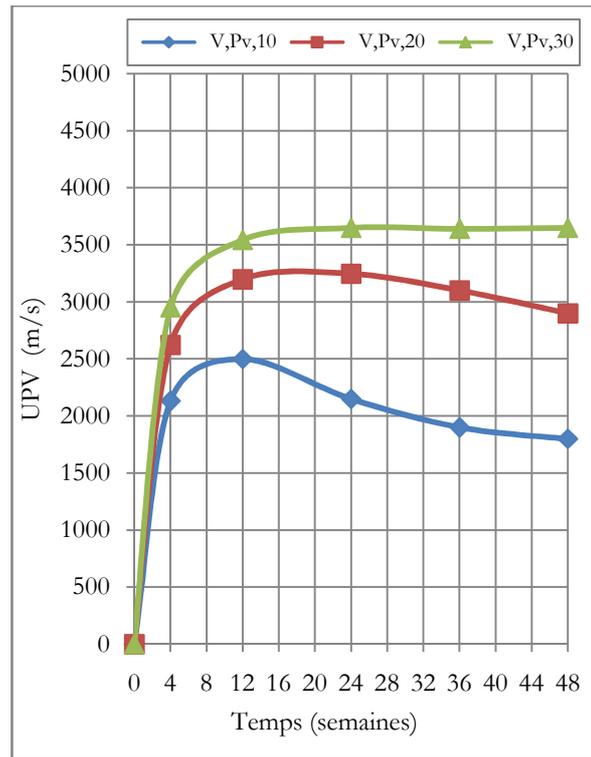
La substitution du ciment par les additions minérales, volume par volume dans un béton à base de granulats de verre recyclé, non-affecté, engendre une amélioration des performances mécaniques (Chapitre IV). Nous avons pu déterminer l'efficacité des additions minérales à contrer les effets néfastes de la RAS, en comparant les résultats obtenus par les bétons affectés avec ceux obtenus par les bétons non-affectés.

VI.6.1. Effet des additions sur la vitesse des impulsions ultrasonores

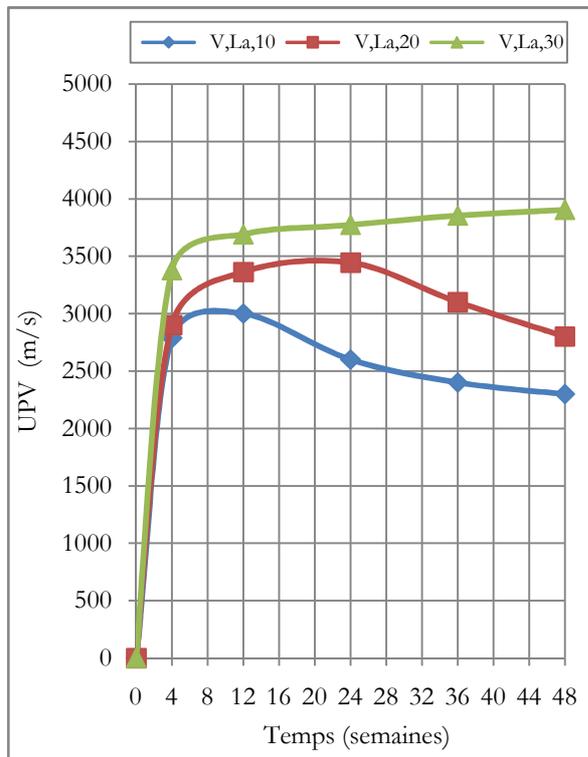
Le suivi de la vitesse de propagation des ultrasons UPV (ultrasonique pulse velocity) mesurée sur des éprouvettes prismatiques des bétons, après (i) jour de conservation en réacteur à 60 °C et 100 % HR, est représenté en fonction de temps par la figure VI. 10.



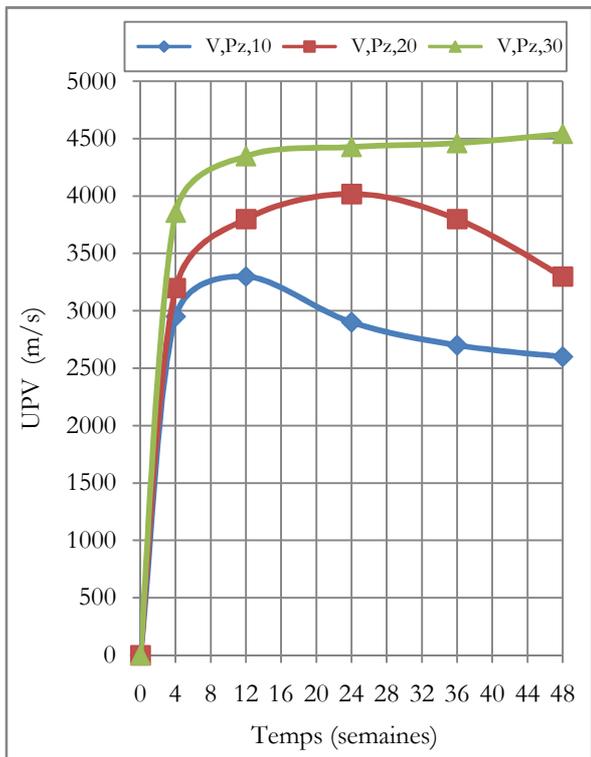
a) Bétons sans additions minérales



b) Bétons avec la poudre de verre



c) Bétons avec le laitier granulé



d) Bétons avec la pouzzolane naturelle

Figure VI. 10. Variation de la vitesse de propagation des ultrasons UPV des bétons, en fonction du temps.

Les courbes de suivi de la vitesse de propagation des ultrasons UPV (ultrasonique pulse velocity) présentées par la figure VI. 10, indiquent une tendance similaire des comportements en présentant une sensibilité élevée à refléter les changements pour les éprouvettes du béton réactif sans additions minérales (V0 %) et les bétons avec la substitution de 10 % de ciment par les additions minérales (béton affecté par la RAS), dont la vitesse des impulsions ultrasonores a augmenté au début et puis a diminué progressivement après avoir atteint une valeur maximale. La diminution de la vitesse des impulsions ultrasonores est une indication de fissures internes, bien qu'à cette période, aucune fissure externe n'a pu être observée. La relation entre la vitesse de propagation des ultrasons UPV et les variations dimensionnelles des bétons est présentée par la figure VI. 11.

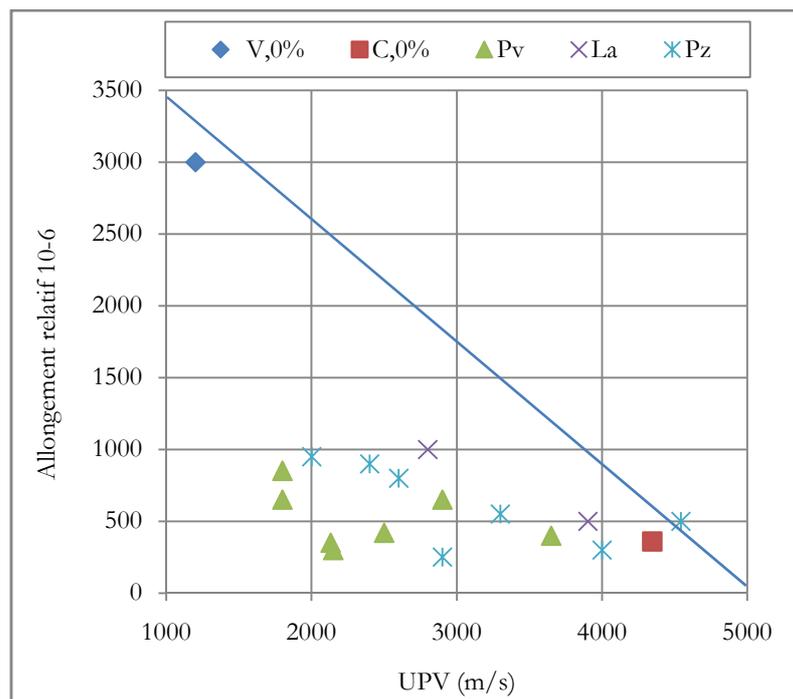


Figure VI. 11. Corrélation entre l'expansion et la vitesse des impulsions des bétons.

À partir de la figure VI. 11, on peut voir que la vitesse des impulsions ultrasonores augmente avec l'expansion des bétons au début, mais elle diminue avec l'expansion croissante après avoir atteint une vitesse d'impulsions maximum. Donc la vitesse des impulsions ultrasonores est inversement proportionnelle avec l'expansion des bétons, elle décrit l'état du cœur des éprouvettes. Swamy et Al-Asali [Swamy. R.N., et Al-Asali. M.M., 1986] montrent par des mesures de vitesse du son que la surface et le cœur du béton sont affectés de la même façon par l'alcali-réaction, même si la surface présente une fissuration visible à l'œil nu alors qu'aucune fissuration n'est observable au cœur.

Pour une plus claire représentation nous avons attribué au béton réactif sans additions minérales (V0 %) une valeur d'expansion beaucoup plus faible. On remarque que tous les points de mesures des bétons avec différentes additions minérales ont des plus faibles valeurs d'expansion et des importantes valeurs de la vitesse des impulsions, grâce à l'effet des additions minérales et avec l'augmentation de taux d'incorporation des additions dans les bétons, les bétons obtenus sont non réactif, donc ils s'approchent au béton de référence (C0 %).

VI.6.2. Effet des additions sur les résistances des bétons affectés

Le suivi des variations des résistances à la traction par flexion et des variations des résistances en compression des bétons réactifs avec additions minérales durant le traitement au réacteur à 60 °C et 100 % HR, est représenté en fonction du temps aux figures VI. 12 et VI. 13.

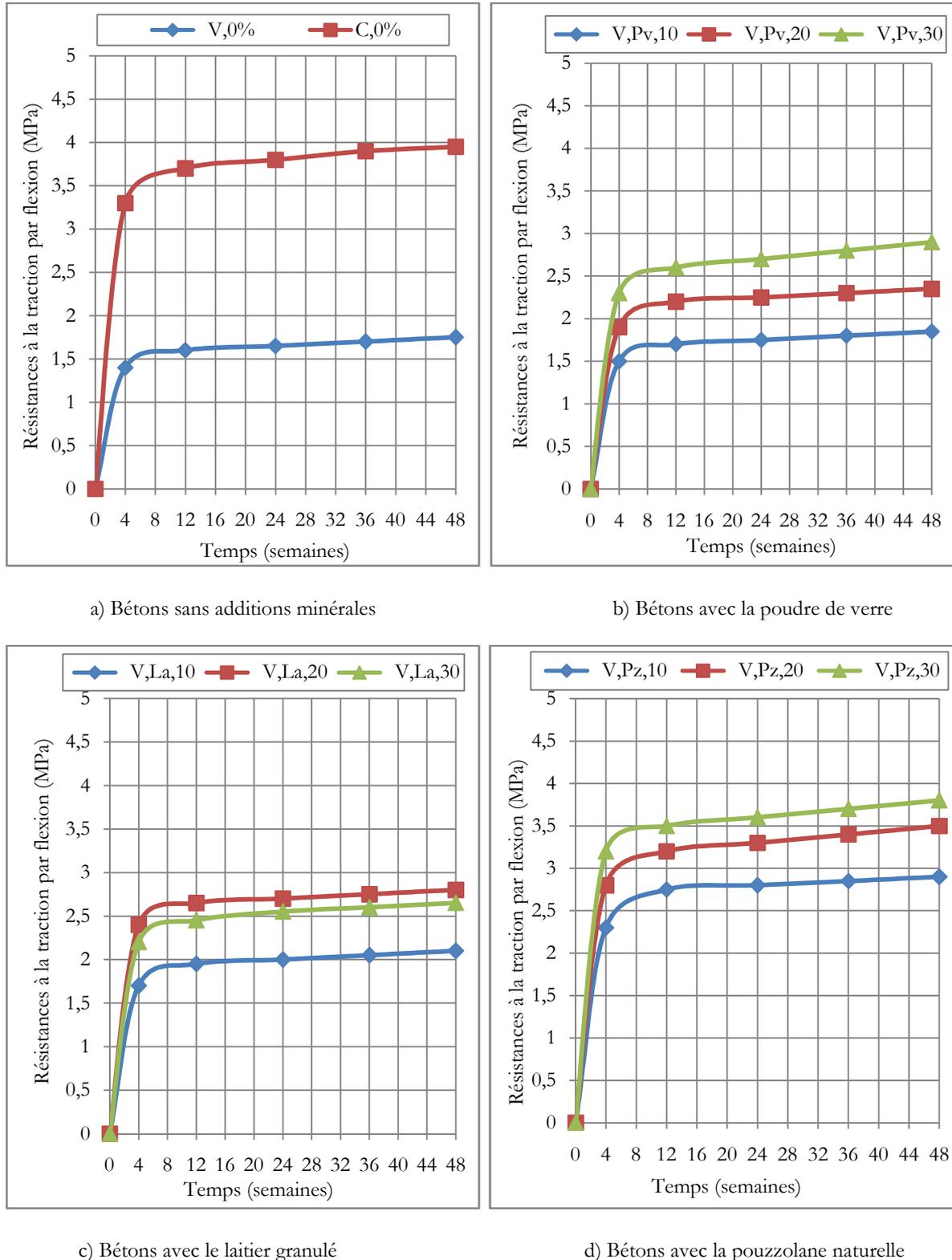
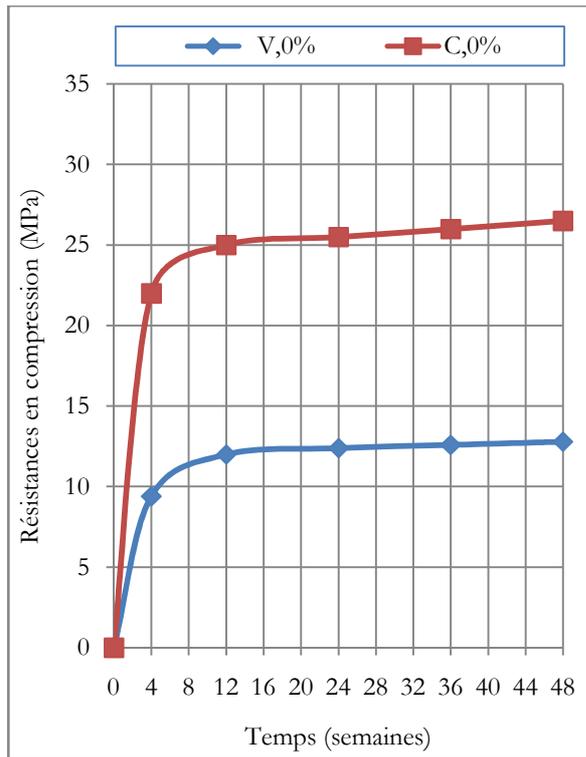
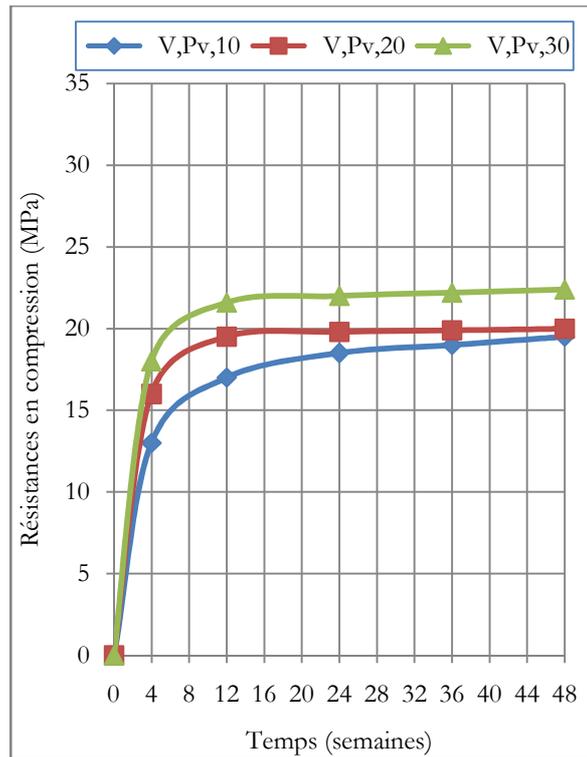


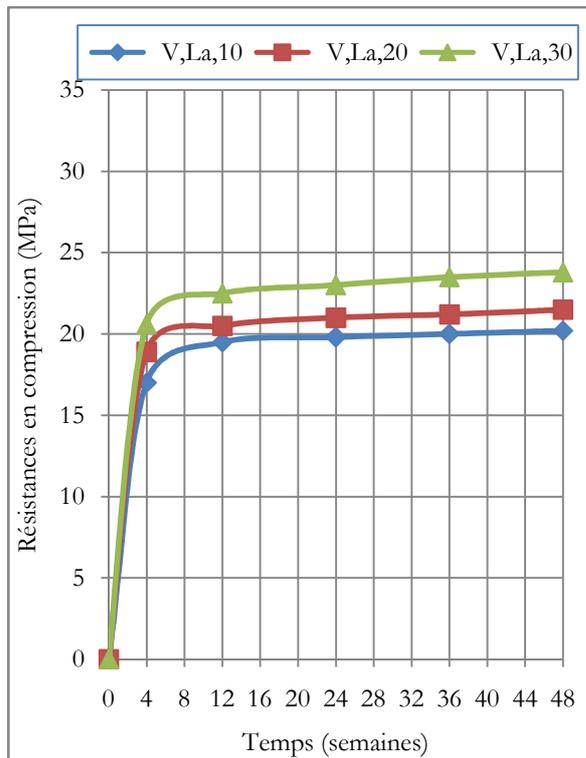
Figure VI. 12. Variation de la résistance à la traction par flexion des bétons, en fonction du temps.



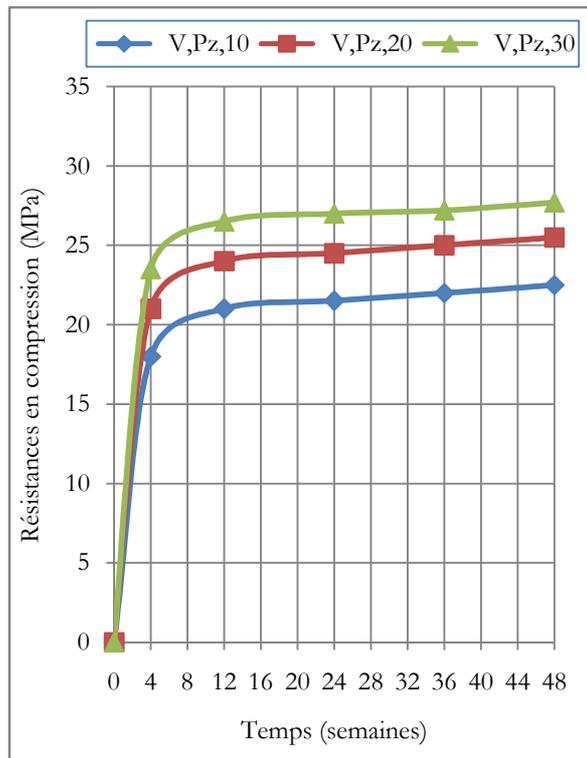
a) Bétons sans additions minérales



b) Bétons avec la poudre de verre



c) Bétons avec le laitier granulé



d) Bétons avec la pouzzolane naturelle

Figure VI. 13. Variation de la résistance en compression des bétons, en fonction du temps.

On constate sur la figure VI. 12 et la figure VI. 13 qu'aucune chute de résistance soit à la traction par flexion, soit en compression n'est mise en évidence durant la durée de traitement au réacteur. Au contraire, les résistances augmentent pour tous les types de bétons, grâce à la poursuite de l'hydratation du ciment dans les conditions chaudes et humides de l'essai. Dès le première échéance, les résistances à la traction par flexion et les résistances en compression du béton réactif avec additions minérales est légèrement supérieure à celle du béton sans additions minérales, ceci est dû à la réaction pouzzolanique des additions minérales que nous avons utilisé, pour des échéances encore élevées. Les résistances continuent à augmenter, aussi bien pour les éprouvettes réactives que non réactives, l'écart s'accroît malgré les gonflements importants des éprouvettes réactives.

VI. 6.2.1. Bétons avec 0 % d'additions minérales :

Les résistances du béton avec granulats inertes (C0 %) sont plus importantes que celles du béton avec granulats réactifs (V0 %). Cet écart est plus important pour la résistance à la traction par flexion que pour la compression, la vitesse d'augmentation de la résistance est aussi plus importante pour le béton (C0 %) que pour le béton (V0 %), et en traction par flexion qu'en compression. Les faibles résistances enregistrées pour le béton sans additions minérales (V0 %) sont dues au gonflement important et à la fissuration dense observée sur les éprouvettes de béton durant le traitement au réacteur.

VI. 6.2.2. Bétons avec 10 % d'additions minérales :

On remarque à l'observation des courbes de la variation des résistances que la substitution de 10 % de ciment par les additions de laitier granulé (La), de pouzzolane naturelle (Pz) et de poudre de verre (Pv), améliore relativement les résistances des bétons, avec une meilleure efficacité de pouzzolane naturelle, car, à ce taux de substitution de ciment par les additions, on a enregistré une réduction de 40 % de la déformation globale finale de béton.

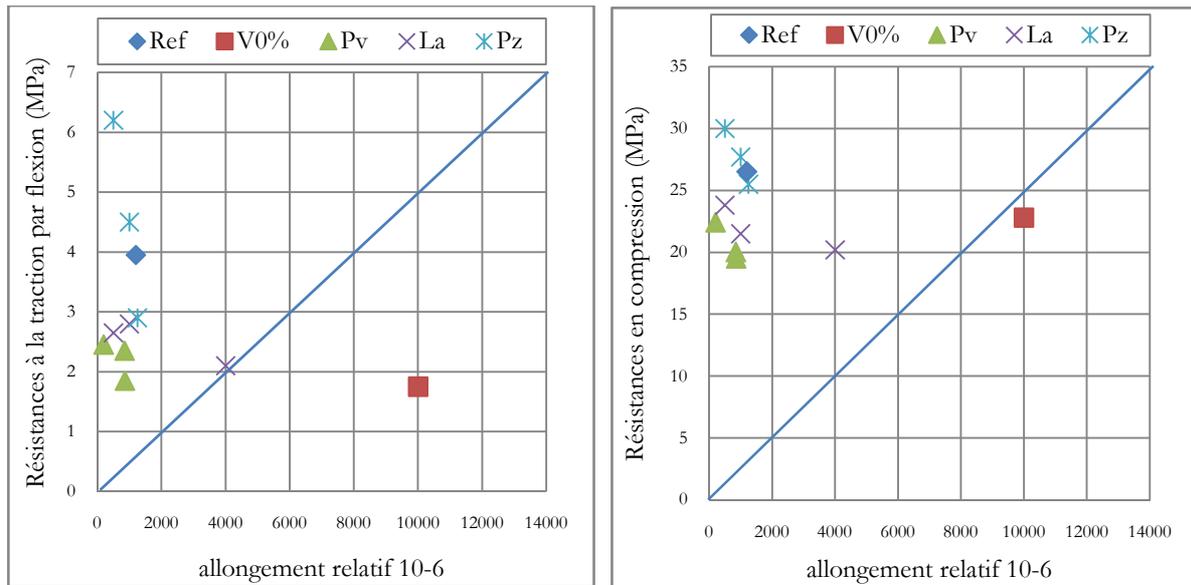
VI. 6.2.3. Bétons avec 20 % d'additions minérales :

L'activité des additions minérales en remplacement partiel de 20 % de volume de ciment à l'amélioration des résistances de béton est remarquablement élevée, ceci s'accorde avec la variation des courbes d'expansion, où on a remarqué un niveau de réduction de l'expansion proche de 80 %, il en résulte que, sur le plan réglementaire, les formulations avec l'incorporation de 20 % des additions minérales sont classées acceptables par NF P 18-454 et FD P 18-456.

VI. 6.2.4. Bétons avec 30 % d'additions minérales :

On constate que 30 % de remplacement du volume de ciment par les additions minérales améliore très fortement les résistances ; car on a remarqué que 30 % de remplacement de ciment par les additions minérales réduisent l'expansion finale jusqu'à (-90 %).

Nous avons représenté sur la figure VI. 14, les valeurs des résistances mécaniques en fonction du gonflement longitudinal des bétons au moment des essais mécaniques. On remarque que les résistances mécaniques ne diminuent pas au même rythme proportionnellement avec l'expansion de béton. Les bétons perdent leurs résistances à la traction par flexion beaucoup plus vite que leurs résistances en compression.



(a) Résistance à la traction

(b) Résistance en compression

Figure VI. 14. Corrélation entre les résistances mécaniques et le gonflement des bétons.

L'incorporation des additions minérales a contribué à l'amélioration des résistances pour les faibles taux de substitution du ciment par les additions minérales. Les bétons présentent des résistances élevées lorsque les valeurs des variations dimensionnelles sont faibles, les résistances dans le cas de la substitution du ciment par de la pouzzolane naturelle, dépassent la résistance enregistrée par le béton de référence sans additions minérales (C0 %), ceci est grâce à l'effet pouzzolanique de cette addition minérale.

Afin de mieux analyser l'influence des additions minérales sur les résistances à la traction par flexion et les résistances en compression des bétons, nous avons étudié la perte des résistances en fonction du taux de substitution du ciment par les additions minérales (en %), dont :

$$\text{Perte de la resistance} = \frac{R_{\text{sain}} - R_{\text{affecté}}}{R_{\text{sain}}} \times 100 \dots\dots\dots(\text{VI. 1})$$

avec :

R sain : résistance du béton sain avec addition minérale.

R affecté : résistance du béton après traitement au réacteur avec addition minérale.

La variation des pertes des résistances à la traction par flexion et les résistances en compression des bétons avec additions minérales, est représentée en fonction du taux de substitution du ciment par la figure VI. 15.

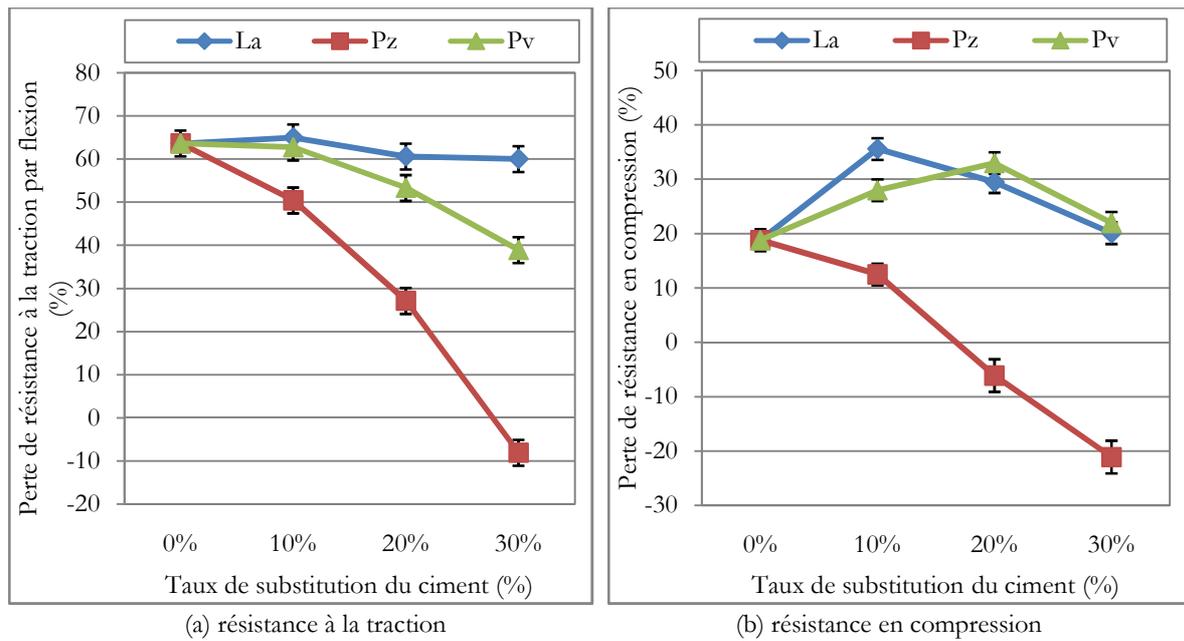


Figure VI. 15. Variation de la perte des résistances à la traction et en compression due à la RAS des bétons, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.

Nous remarquons sur la figure VI. 15, que la RAS entraîne des pertes des résistances mécaniques observées pour le béton sans additions minérales (V0 %), de 65 % et 20 %, pour la résistance à la traction par flexion et la résistance en compression, respectivement. Ces résultats correspondent bien à ceux obtenus par d'autres auteurs.

Abe. M., Kikuta. S., Masuda. Y., Tomozawa. F., [Abe. M., et al. 1989] a observé l'évolution temporelle de la résistance en compression d'éprouvettes de béton. Après 167 jours, la chute était de 28 % ; après 513 jours, elle n'était que de 23 %. Sur des carottes extraites d'une poutre coulée avec le même béton, la résistance en compression avait augmenté de 9 %. Pour Pleau, R., Bérubé, M.A., Pigeon, M., Fournier, B. et Raphael, S., [Pleau R., et al. 1989], les pertes de résistance par rapport à un béton sain sont de 45 %, aussi bien en compression qu'en traction. Inoue. S., Fuji. M., Kobayashi. K., et Nakano. K., [Inoue. S., et al. 1989] a mené une étude sur des éprouvettes cylindriques de 10 cm de diamètre et de 20 cm de hauteur, en comparant un béton réactif et un béton témoin a révélé, au bout de 178 jours de cure accélérée à 40 °C, 100 % d'humidité relative, des baisses par rapport au béton sain de : 64 % pour la résistance en compression et 59 % pour la résistance en traction. Kohno K., Sugimoto A., et Kashiwai T., [Ohno. S., et al. 1989] a comparé les résultats d'un béton réactif et d'un béton non réactif sur des éprouvettes conservées sous des conditions climatiques, les résultats sont les suivants :

- à 28 jours, la résistance en compression du béton réactif est supérieure de 113 % à celle du béton non-réactif.

- au bout de 17 mois, elle lui est inférieure de 13 %.

- après 45 mois, la comparaison a été faite sur des carottes extraites de poutres en béton armé. La résistance du béton réactif est inférieure de 49 % à celle du béton non-réactif.

Selon Swamy. R.N., et Al-Asali M.M., [Swamy et Al-Asali 1989], pour un béton dont le gonflement libre longitudinal est compris entre 0.5 et 1.5 %, les chutes des caractéristiques mécaniques sont de l'ordre de : 40 à 60 % pour la résistance en compression et 65 à 80 % pour la résistance en traction.

Pour de nombreux auteurs dont ; Blight. G. E., Alexander. M. G., Schutte. W. K., et Ralph. T. K., [Blight. G. E., et al. 1983], Swamy. R.N., et Al-Asali M.M. [Swamy et Al-Asali 1989], Wood. J.G.M. [Wood. J.G.M. 1989], Nixon P.J., et Page C.L., [Nixon P.J., et Page C.L., 1987], Clark. L.A., et Ng. K.E., [Clark. L.A., et Ng. K.E., 1989], la résistance à la traction diminue plus sensiblement que la résistance en compression. Pour d'autres dont ; Bérubé M.A., Duchesne J., et Chouinard D., [Bérubé. M. A., et al. 1995], Carles-G.A. et Cyr. M. [Carles-G.A. et Cyr. M. 2002] et Hobbs, D.W. [Hobbs, D.W. 1988], le rapport résistance en traction sur résistance en compression reste constant (de l'ordre de 0.1). Rigden S. R., Majlesi Y., et Burley E., [Rigden et al. 1995] concluent à des chutes de résistance beaucoup moins importantes, sur un béton très réactif (expansion libre de 1.8 %) et contenant 15 % de silice fondue en remplacement du granulats réactif, ne mentionnent qu'une chute de résistance en compression d'environ 7 % après près de 2 ans de conservation en humidité à 38 °C. D'autres bétons placés dans les mêmes conditions expérimentales, et toujours très réactifs (expansion libre de 0.9 %), présentaient des augmentations de résistance en compression de plus de 10 %. Ces auteurs posent le réel problème du choix des formulations témoins. De fait, les résistances en compression de bétons atteints d'alcali-réaction sont souvent comparées aux valeurs mesurées sur un béton non-réactif, sans que l'on ait toujours les moyens de juger si la comparaison est pertinente.

L'incorporation des additions minérales a contribué à la réduction de la perte des résistances. On peut classer les additions minérales selon leur efficacité à contrer cette perte dans l'ordre croissant suivant : laitier granulé, poudre de verre et finalement la pouzzolane naturelle. La pouzzolane naturelle a engendré des gains considérables des résistances dont les bétons ont présenté une variation dimensionnelle inférieure au seuil suggéré par la norme NF P18-454 et ils sont jugés comme des bétons non-réactifs. La réduction de la perte des résistances soit à la traction par flexion ou en compression est peut-être due à la réaction pouzzolanique des additions minérales observée par l'amélioration considérable des résistances des bétons en granulats de verre recyclé non-affectés par la RAS, (qui ont subi une cure sous l'eau durant 28 jours).

VI.6.3. Facteurs influençant sur les résistances mécaniques

L'objectif essentiel de cette partie de thèse consistait à vérifier l'idée que l'introduction, dans un béton renfermant des granulats alcali-réactifs, d'additions minérales était susceptible de réduire ou de supprimer les gonflements délétères : nous avons effectué des essais mécaniques et les résultats obtenus lors des essais de rupture par flexion et par compression des éprouvettes en fin de traitement dans le réacteur à 60 °C et à 100 % HR, conduisent à des conclusions intéressantes que nous allons exposer ci-dessous.

- soit R_m la résistance mécanique d'un béton mesurée après une durée de traitement dans le réacteur à 60 °C et à 100 % HR. On peut écrire :

$$R_m = R (\text{composition du béton}) + g (\text{traitement}) \dots \dots \dots (VI. 2)$$

Dans la composition initiale interviennent les facteurs de 1^{er} ordre : classe de ciment, rapport E/C, qualité des granulats, qualité des additions minérales. Dans l'expression $g(\text{traitement})$ on prendra en compte : l'action de la température et de l'hygrométrie de l'ambiance, l'action de la réaction alcali-silice, l'action de la réaction pouzzolanique supposée se produire.

VI.6.3.1. Influence de la composition du béton

Les valeurs de résistances reportées dans le tableau VI. 6 sont exposées au chapitre V, il s'agit des résistances mécaniques atteintes par des bétons sains, avec le granulat inerte et le granulat de verre recyclé (réactif) et les mêmes additions minérales, dans des conditions de conservation normales, après 24 mois, en l'absence de toute réaction interne de la RAS.

Tableau VI. 6. Résistances mécaniques des bétons Rb (MPa)

Taux de substitution de ciment		0 %	10 %	20 %	30 %	Moyenne horizontale
Granulat non réactif	Rf	6.80	-	-	-	6.80
	Rc	24.4	-	-	-	24.4
Granulat réactif	Rf	4.40	-	-	-	4.40
	Rc	23.9	-	-	-	23.9
Poudre de verre	Rf	-	4.50	4.00	3.60	4.03
	Rc	-	20.5	17.0	14.0	17.2
Laitier granulé	Rf	-	6.00	6.50	5.00	5.83
	Rc	-	26.8	27.8	22.1	25.6
Pouzzolane naturelle	Rf	-	5.04	4.80	4.30	4.71
	Rc	-	26.4	23.0	21.8	23.73
Moyenne verticale	Rf	5.60	5.18	5.1	4.3	
	Rc	24.2	24.6	22.6	19.3	
Rf : résistance à la traction par flexion (MPa) Rc : résistance en compression (MPa)						

VI.6.3.2. Influence multifactorielle du traitement des bétons

Sachant que les valeurs Rb reportées dans le tableau VI. 6 correspondent au 1^{er} terme de la relation (VI. 2), nous pouvons écrire :

$$R_m = R_b + g \text{ (traitement)} \dots\dots\dots (VI. 3)$$

$$g \text{ (traitement)} = |R_m - R_b| = \Delta R_m \dots\dots\dots (VI. 4)$$

Nous avons calculé les différentes valeurs de ΔR_m et les avons reportées dans le tableau VI. 7

Tableau VI. 7. Différentes valeurs de résistances mécaniques des bétons ΔR_m (MPa)

Taux de substitution de ciment		0 %	10 %	20 %	30 %	Moyenne horizontale
Granulat non réactif	ΔR_f	-3.30	-	-	-	-3.30
	ΔR_c	-1.50	-	-	-	-1.50
Granulat réactif	ΔR_f	-2.80	-	-	-	-2.80
	ΔR_c	-4.50	-	-	-	-4.50
Poudre de verre	ΔR_f	-	-2.82	-1.90	-1.40	- 2.04
	ΔR_c	-	-3.30	+1.00	+5.50	+ 1.07
Laitier granulé	ΔR_f	-	-4.25	-4.00	-2.60	- 3.62
	ΔR_c	-	-8.90	-8.90	-1.50	- 6.43
Pouzzolane naturelle	ΔR_f	-	-2.54	-1.30	+0.68	- 1.05
	ΔR_c	-	-3.30	+1.40	+4.60	+ 0.90
Moyenne verticale	ΔR_f		- 3.20	- 2.40	- 1.11	
	ΔR_c		-5.17	- 2.17	+ 2.87	
ΔR_f : Différence de résistance à la traction par flexion (MPa) ΔR_c : Différence de résistance en compression (MPa)						

Nous pouvons supposer que ΔR_m est la résultante de plusieurs facteurs, dont trois au moins peuvent être identifiés.

- ΔRAS : la réaction alcali-silice, qui entraîne généralement une baisse de résistance.
- ΔRPz : la réaction pouzzolanique, qui provoque une augmentation de résistance.
- ΔT° : la température, ici 60 °C et 100 % HR au lieu de 20 °C.

$$\Delta Rm = \Delta RAS + \Delta RPz + \Delta T^\circ \dots\dots\dots (VI. 5)$$

Les valeurs de ΔRm enregistrées pour le béton de référence (C.0 %) nous permettent de calculer ΔT° , en effet dans ce cas $\Delta Rm = \Delta T^\circ$ puisque ces granulats sont réputés non alcali réactif et ne sont pas pouzzolaniques pour la raison qu'ils sont sans additions minérales, donc :

$$Rm(C.0\%) = Rb(C.0\%) + \Delta T^\circ \dots\dots\dots (VI. 6)$$

$$\Delta T^\circ = Rm(C.0\%) - Rb(C.0\%) \dots\dots\dots (VI. 7)$$

Les valeurs de Rb de deux bétons sans additions minérales sont comparables, nous ferons donc l'approximation que tous subissent le même gain ΔT° , dans ces conditions, on peut écrire, pour ces bétons seulement :

$$Rm(V.0\%) = Rb(V.0\%) + \Delta T^\circ + \Delta RAS \dots\dots\dots (VI. 8)$$

$$\Delta RAS = Rm(V.0\%) - Rb(V.0\%) - \Delta T^\circ \dots\dots\dots (VI. 9)$$

$$\Delta RAS = \Delta Rm (V.0\%) - \Delta T^\circ \dots\dots\dots (VI. 10)$$

Car on peut supposer que les bétons sans additions minérales ne possèdent pas d'activité pouzzolanique, ce qui entraîne $\Delta RPz = 0$. Enfin, la composante ΔRPz sera calculée pour les bétons avec additions minérales de la façon suivante : Soit Rm la résistance d'une formulation sans additions minérales, $R'm$ la résistance de la formulation correspondante avec additions minérales, la relation (VI. 3) s'écrit alors :

$$Rm = Rb + \Delta T^\circ + \Delta RAS$$

$$R'm = R'b + \Delta T^\circ + \Delta RAS + \Delta RPz$$

d'où l'on peut déduire par soustraction : $R'm - Rm : \Delta RPz = (R'm - Rm) - (R'b - Rb) \dots\dots (VI. 11)$

Le tableau VI. 8 donne les valeurs calculées pour ΔRAS , ΔRPz et ΔT°

Tableau VI. 8. Valeurs de ΔRAS , ΔRPz et ΔT° (MPa)

Taux de substitution de ciment		0 %	10 %	20 %	30 %	Moyenne horizontale	
Granulat non réactif	ΔRf	ΔT°	- 3.30	-	-	-	- 3.30
	ΔRc	ΔT°	- 1.50	-	-	-	- 1.50
Granulat réactif	ΔRf	ΔRAS	+0.50	-	-	-	+0.50
	ΔRc	ΔRAS	- 3.00	-	-	-	- 3.00
Poudre de verre	ΔRf	ΔRPz	-	- 0.02	+ 0.9	+ 1.40	+ 0.76
	ΔRc	ΔRPz	-	+ 1.20	+ 5.50	+ 10.0	+ 5.57
Laitier granulé	ΔRf	ΔRPz	-	- 1.45	- 1.20	+ 0.20	- 0.82
	ΔRc	ΔRPz	-	- 4.40	- 4.40	+ 3.00	- 1.93
Pouzzolane naturelle	ΔRf	ΔRPz	-	+ 0.26	+ 1.50	+ 3.48	+ 1.75
	ΔRc	ΔRPz	-	+ 1.20	+ 5.90	+ 9.10	+ 5.40
Moyenne verticale	ΔRf		- 1.40	- 0.40	+ 0.40	+ 1.69	
	ΔRc		- 2.25	- 0.67	+ 2.33	+ 7.37	
		ΔRAS : Différence de résistance due à la réaction alcali-silice ΔRPz : Différence de résistance due à la réaction pouzzolanique ΔT° : Différence de résistance due la température et d'hygrométrie.					

Son interprétation, nous permet de mieux définir l'activité des additions minérales. Le niveau de résistances mécaniques mesurées après une durée déterminée de traitement dépend tout d'abord des conditions de températures et d'hygrométrie du test et, ensuite, de la compétition de deux phénomènes aux effets opposés : la RAS dépendante de la réactivité des granulats et la réaction pouzzolanique dépendante de la finesse et la quantité des additions minérales. La figure VI. 16 visualise les variations des paramètres ΔRAS et ΔRPz .

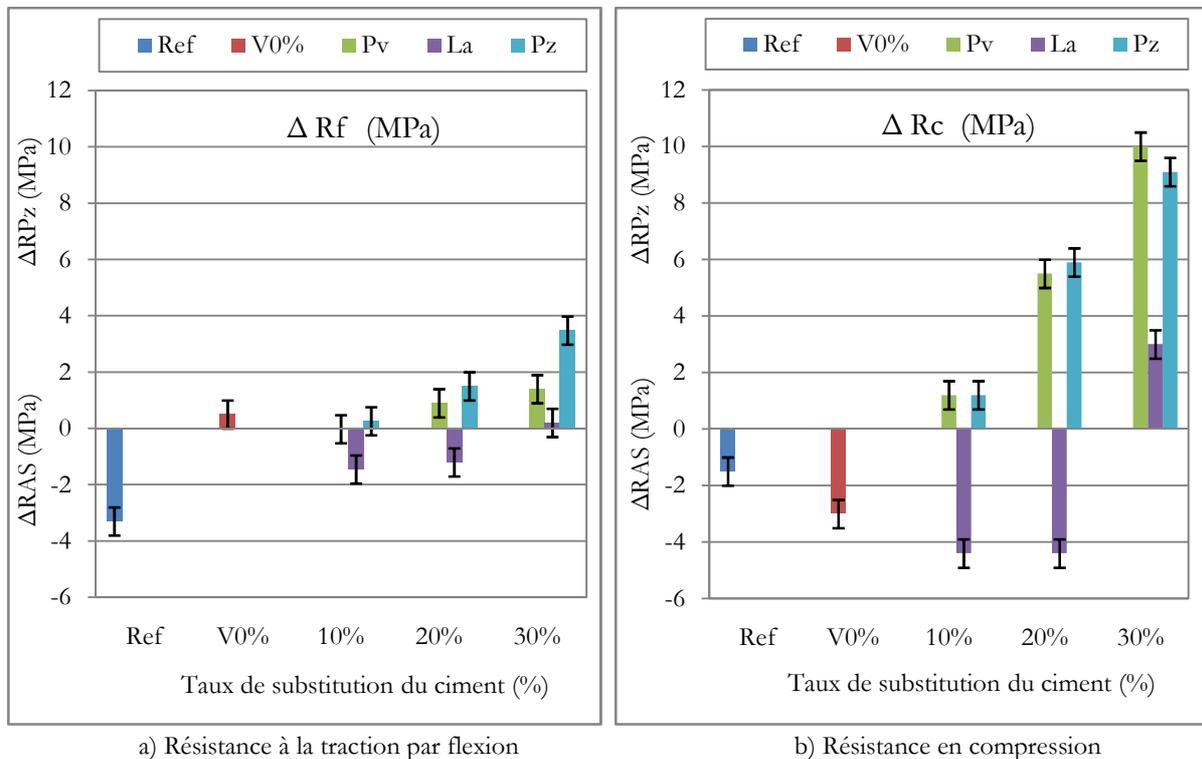


Figure VI. 16. Réduction des résistances due à la RAS (et augmentation due à la RPz) (MPa)

Cette figure n'explique pas les mécanismes réactionnels, mais elle attire l'attention sur la diversité des situations : l'intensité des composants ΔRAS et ΔRPz varie, mais aussi le rapport des intensités $\Delta RAS/\Delta RPz$. Si l'on compare les valeurs ΔRPz pour les différentes additions minérales, on constate qu'elles sont très différentes : 10 MPa pour 30 % de substitution de ciment par la poudre de verre et seulement 3 MPa pour 30 % de substitution de ciment par le laitier granulé. ΔRPz supprime le gonflement et la fissuration de bétons confectionnés avec de granulat réactif et remonte le niveau des résistances mécaniques, grâce à une diminution de la RAS plus d'autres phénomènes. La bibliographie explicite les différents mécanismes d'action par lesquels les additions minérales réduisent les effets néfastes de la RAS tels que :

- la baisse de la perméabilité et de la diffusivité ionique de la pâte de ciment,
- l'augmentation de la résistance à la déformation,
- la dilution d'alcalins,
- la consommation de la portlandite,
- l'influence de la composition des gels sur leurs propriétés,
- la formation d'hydrates piégeant les alcalins.

VI.7. CONCLUSION

Le principal objectif de ce chapitre était de vérifier l'effet des additions minérales sur la RAS des bétons. Nous avons utilisé un granulats réactif qu'est le verre à vitre recyclé (GVR) et un granulats inerte de type calcaire concassé (GCC), auxquels nous avons incorporé en substitution progressive de 0 % à 30 % en volume de ciment, du laitier granulé (La), de la pouzzolane naturelle (Pz) et de la poudre de verre (Pv).

Après l'étude de l'effet des additions minérales sur les propriétés des bétons frais, nous avons remarqué que :

- L'incorporation de ces additions dans les bétons à faibles taux de substitution du ciment, améliore la plasticité des bétons, qui deviennent plus fermes à plus forts taux de substitution.
- Pour les faibles taux de substitution de ciment, le besoin en eau est directement lié aux phénomènes de l'empilement granulaire, alors qu'à plus forts taux de substitution, les particules des additions deviennent plus sensibles aux forces inter-particulaires et aux tensions superficielles de la phase liquide.
- La compacité des bétons frais avec additions minérales reste comparable à celle de béton de référence.
- Le besoin en adjuvants, pour des taux de substitution inférieurs à 10 % est plus faible que celui des bétons de référence, à plus forts taux de substitution du ciment, il croît avec l'augmentation de la quantité d'addition dans le mélange, mais diffère d'une addition à une autre.

Après l'étude de l'effet des additions sur les variations pondérales et dimensionnelles des bétons affectés, nous avons remarqué que :

- Pour les variations pondérales, on observe que les absorptions d'eau des bétons varient dans le même sens que les variations dimensionnelles : elles sont d'autant plus importantes que les variations dimensionnelles sont élevées.
- Les courbes de variations dimensionnelles traduisent des cinétiques extrêmement variables, leur allure est en bon accord avec les courbes expérimentales obtenues par d'autres auteurs. Les variations dimensionnelles du béton (C.0 %) est inférieure à la valeur limite de $200 \mu\text{m}/\text{m}$ à 3 mois, avec une vitesse très faible. Il y a donc, concordance avec le classement "non réactif" des granulats obtenus par l'essai à l'autoclave. Les variations dimensionnelles du béton (V0 %) sont très importantes avec une cinétique extrêmement rapide, sa courbe présente une pente finale non nulle de $30.10^{-6}/\text{semaine}$.
- L'incorporation de 10 % d'additions réduit de 40 % l'expansion finale, à 96 semaines, baisse la vitesse d'expansion (-53 %) et engendre un allongement de la durée totale de la RAS, mais comme il faut tenir compte du fait que la pente de la courbe n'est pas nulle, nous observons que leur activité est faible et ne permet pas de requalifier le béton avec 10 % d'additions comme non réactif.
- Les formulations avec l'incorporation de 20 % et 30 % des additions minérales sont classées acceptables par la norme NF P 18-454 et le fascicule FD P 18-456, car elles assurent une réduction de l'expansion proche de 80 % et 90 %, respectivement.

Après l'étude de l'effet des additions sur la fissuration des bétons affectés, nous avons remarqué que :

- La largeur et la densité des fissures des éprouvettes des bétons avec additions sont relativement variables, aucune fissure n'a été observée sur les éprouvettes des bétons avec 30 % d'additions et le béton avec 20 % de la pouzzolane naturelle. Les fissures apparues sur les éprouvettes du béton (V0 %) sont les plus larges et denses.
- La variation de la fissuration est proportionnelle avec la variation dimensionnelle des bétons affectés.

Après l'étude de l'effet des additions sur les performances mécaniques des bétons affectés, nous avons remarqué que :

- L'évolution de la vitesse des impulsions ultrasonores avec le temps pour le béton (V0 %) et les bétons avec 10 % d'additions a augmenté au début puis a diminué progressivement après avoir atteint une valeur maximale, la diminution de la vitesse des impulsions ultrasonores indique la fissuration interne due à la RAS.
- La variation de vitesse des impulsions ultrasonores est inversement proportionnelle avec la variation de l'expansion des bétons.
- Aucune chute de résistance soit à la traction par flexion soit en compression n'est mise en évidence durant la durée de traitement au réacteur. L'augmentation des résistances est due la poursuite de l'hydratation du ciment dans les conditions chaudes et humides de l'essai. La variation des résistances mécaniques est proportionnelle avec l'expansion de béton.
- La perte des résistances des bétons à la traction par flexion est beaucoup plus tôt et plus élevé que la perte des résistances en compression. L'incorporation des additions minérales a contribué à la réduction de la perte des résistances, en particulier la pouzzolane naturelle.
- Les résistances mécaniques mesurées après une durée déterminée de traitement dans le réacteur dépend tout d'abord des conditions de températures et d'hygrométrie du test et, ensuite, de la compétition de deux phénomènes dus aux effets opposés : la RAS dépendante de la réactivité des granulats et la réaction pouzzolanique dépendante de la finesse et la quantité des additions minérales

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Les principaux résultats obtenus dans cette étude peuvent se résumer comme suit :

Pour les pâtes de liants avec additions minérales :

- L'incorporation des additions minérales engendre : une variation de la consistance normale et une augmentation du temps de prise, très influencée par la nature et la quantité de l'addition minérale incorporée, la fumée de silice est l'addition qui influe plus sur ces caractéristiques.

Pour les mortiers avec additions minérales à l'état frais :

- Le comportement rhéologique (maniabilité, besoin en eau et la compacité) dépend de la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires et la quantité d'additions incorporée dans le mélange
- La présence des additions minérales dans les mortiers réduit l'efficacité de l'adjuvant superplastifiant.

Pour les mortiers avec additions minérales à l'état durci :

- L'incorporation des additions minérales dans des mortiers sans adjuvant engendre des variations des performances mécaniques, à 7 jours et à 28 jours, qu'elles varient sensiblement avec la nature minéralogique, les caractéristiques granulaires et la quantité d'additions incorporée dans le mélange.

- L'effet des fillers calcaires et la poudre de verre est limitée à une accélération du processus d'hydratation aux jeunes âges. L'effet de la pouzzolane naturelle, du laitier granulé et de la fumée de silice maintient mieux à 28 jours qu'à 7 jours d'âge, grâce à la réaction pouzzolanique latente, malgré que l'effet de la fumée de silice se trouve atténué par les besoins en eau importants nécessaires pour le maintien de la consistance de référence.

- L'action combinée des additions minérales et d'un superplastifiant sur les performances mécaniques à 28 jours, est favorable à faibles taux de substitution du ciment, ces performances mécaniques sont plus importantes que ceux des mortiers avec additions minérales sans superplastifiant.

- L'apport des additions minérales aux performances mécaniques est dû à :

- o La maîtrise de l'effet granulaire défavorable pour certaines additions minérales, par l'utilisation des superplastifiants qui peuvent aussi participer à l'amélioration du processus d'hydratation.

- o L'activité chimique de l'addition minérale, qui dans le cas des additions classé du type II selon la norme européenne EN 206-1, apporte un complément significatif au gain de résistance.

L'étude des bétons a été limitée aux additions laitier granulé (La), pouzzolane naturelle (Pz), fillers calcaires (Fc) et poudre de verre (Pv), et à 30 % de taux de substitution de ciment par les

additions minérales, avec l'utilisation de deux granulats, un granulats de type calcaire concassé (GCC), un granulats de type verre recyclé (GVR).

Nous avons tiré les conclusions suivantes :

Pour les bétons avec additions minérales à l'état frais :

- L'ouvrabilité et la compacité des bétons GCC et GVR avec poudre de verre (Pv), fillers calcaires (Fc) et pouzzolane naturelle (Pz), est presque similaire à celui des mortiers avec ces mêmes additions, mais le comportement des bétons avec laitier granulé (La) diffère à faibles taux de substitution du ciment de celui des mortiers avec la même addition.
- Les bétons GCC et GVR avec additions minérales présentent un besoin en eau plus faibles que celui des bétons de référence pour des taux de substitution du ciment inférieurs à 10 %. Ceci indique une optimisation du squelette granulaire de la matrice cimentaire à ce taux de substitution. A plus forts taux de substitution du ciment par les additions, le besoin en eau croît proportionnellement avec la quantité d'additions dans le mélange, mais diffère d'une addition à une autre.
- La variation du besoin en adjuvant suit globalement les mêmes comportements que la variation du besoin en eau des bétons GCC et GVR avec additions sans adjuvants.

Pour les bétons avec additions minérales à l'état durci :

- L'utilisation des additions minérales à faibles taux avec le superplastifiant apporte des améliorations significatives aux propriétés mécaniques.
- Pour les bétons avec le laitier granulé, classé en type II selon la norme européenne EN 206-1, ces améliorations sont significatives à 20 % du taux de substitution de ciment.
- Pour les bétons avec de la pouzzolane naturelle classée en type I selon la norme européenne EN 206-1, les améliorations de résistances peuvent être aussi intéressantes à 10 % du taux de substitution.
- Pour les bétons avec les fillers calcaires et les bétons avec la poudre de verre, classées en type I selon la norme européenne EN 206-1. Les améliorations de résistances à 28 jours, restent assez limitées à 10 % du taux de substitution. À 7 jours, les améliorations sont beaucoup plus intéressantes.

Les résultats essentiels sur mortiers renfermant un granulats réactif sont les suivants :

- La RAS a effectivement provoqué pour le mortier sans additions minérales des variations dimensionnelle et pondérale significatives, il existe une forte corrélation entre les variations pondérales et les variations dimensionnelles des mortiers affectés par la RAS.
- La RAS entraîne une perte de résistance mécanique, cette perte de résistance à la traction par flexion est plus importante que la perte de la résistance en compression.
- Lorsque l'on substitue une fraction de ciment par le même volume d'additions minérales, on réduit les variations dimensionnelles et pondérales et les pertes des résistances mécaniques due à la RAS, d'autant plus que la quantité d'additions minérales introduite est importante.
- La pouzzolane naturelle (Pz) présente une efficacité à contrer la RAS, meilleure que le laitier granulé (La). Les fillers calcaires (Fc) est l'addition la moins efficace à contrer la RAS, même pour le taux de 50 % de substitution du ciment par cette addition.

L'étude sur les bétons a tenté de corréler leur expansion, leur fissuration et leurs résistances mécaniques avec les additions minérales, notamment leur nature et leur quantité. Elle a conduit aux conclusions suivantes :

- Les formulations avec l'incorporation de 20 % et 30 % des additions minérales, les additions réduisent l'expansion due à la réaction alcali-silice, cette réduction croît avec la nature et la quantité d'additions incorporées.
- La réduction d'expansion est accompagnée d'une réduction voire une annulation des chutes de résistances mécaniques et une forte diminution de la fissuration endogène.

En définitive, nous pensons que les additions minérales diminuent l'expansion de bétons sujets à la RAS par les processus suivants :

- Les additions produisent des C-S-H pouzzolaniques qui fixent précocement une fraction importante des alcalins de la solution interstitielle.
- Cette dernière, son alcalinité, étant abaissée, devient beaucoup moins agressive pour les granulats réactifs.
- Ces mécanismes chimiques ont une action bénéfique renforcée par le fait que les C-S-H pouzzolaniques dus à la réaction des additions, même s'ils sont gonflants, sont plus facilement absorbables par la porosité de la pâte que ne le seraient les produits, réactionnels des granulats réactifs.

Nos concluons acquérir une portée plus générale si ce travail était complété par une étude de la microstructure des bétons pour y détecter l'existence de ces gels et pour savoir si l'action des additions s'exerce d'abord au niveau de ces gels (par réduction, suppression ou modification de composition) entraînant comme conséquence la réduction ou la disparition des effets délétères de la réaction alcali-silice.

**REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

Références Bibliographiques

- [Abe. et al., 1989] Abe. M., Kikuta. S., Masuda. Y., Tomozawa. F., (1989) Experimental study of mechanical behavior of reinforced concrete members affected by Alkali-Aggregate Reaction, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, pp. 691-696.
- [Aichouba, A. 2005] Aichouba, A. (2005) Effet des pouzzolanes naturelles sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire, Mémoire de magistère en génie civil, USTMB d'Oran, Algérie.
- [Alasali. 1989] Alasali, M.M. (1989) Alkali-aggregate reaction in concrete : investigations of concrete expansion from alkali contributed by pozzolans or slag, Proceedings of the Third International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, (Ed. V.M. Malhotra), ACI SP-114, Volume 1, American Concrete Institute, Detroit, pp. 431-451.
- [Anderson et Seals. 1981] Anderson D A, Seals R K., (1981) Pulse velocity as predictor of 28 days strength, ACI J., 78, 116.
- [Baalbaki. W., et al. 1992] Baalbaki, W., Aitcin, P-C., et Ballivy, G. (1992) On predicting elastic modulus of high-strength concrete, ACI Materials Journal, 89(5): 517-20.
- Barnett, S.J., Soutsos, M.N., Millard, S.G., Bungey, J.H. (2006) Strength development of mortars containing ground granulated blast furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies, Cement and Concrete Research, 36: 434-40.
- [Batayneh et al., 2007] Batayneh, M., Marie, I. et Asi, I. (2007) Use of selected waste materials in concrete mixes, Waste Management, vol. 27, n°.12, p.1870-1876
- [Bérubé. et al., 1995] Bérubé M.A., Duchesne J., et Chouinard D., (1995) Why the accelerated mortar bar method ASTM C 1260 is reliable for evaluating the effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to alkali-silica reactivity, Cement, Concrete and Aggregates, v 17, n 1, 26-33
- [Bérubé et Duchesne 1992] Bérubé M.A., et Duchesne J., (1992) Does silica fume merely postpone expansion due to alkali aggregate reactivity, 9th International Conference on AAR in Concrete, London, U.K., 71-80.
- [Bessa-Badreddine, 2004] Bessa-Badreddine, A., (2004) Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers, Thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise.
- [Bhanja et Sengupta, 2005] Bhanja, S., Sengupta, B. (2005) Influence of silica fume on the tensile strength of concrete. Cem. Concr. Res. 35(4), 743–747.
- [Bleszynski et Thomas, 1998] Bleszynski R.F., et Thomas M.D.A., (1998) Microstructural studies of alkali-silica reaction in fly ash concrete immersed in alkaline solutions, Advanced in Cement Based Materials, v 7, n 2, 66-78.
- [Blight. G. E., et al., 1983] Blight. G. E., Alexander. M. G., Schutte. W. K., et Ralph. T. K., (1983) The effect of alkali-aggregate reaction on the strength and deformation of reinforced concrete structure, 6th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Copenhagen, Denmark, pp. 401-410.
- [Boddy et al., 2003] Boddy, A.M., Hooton, R.D., Thomas, M.D.A. (2003) The effect of the silica content of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction. Cem. Concr. Res. 33(8), 1263–1268.
- [Bollotte. B., 1992] Bollotte B., (1992) Development of an accelerated performance test on concrete for evaluating its resistance to AAR, 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London, Great Britain, pp. 110-116.
- [Bonavetti, V., et al. 2001] Bonavetti, V., Rahhal, V., et Irassar, E. (2001) Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. Cement and Concrete Research 31, 853-859.
- [Bonavetti, V., et al. 2003] Bonavetti, V., Donza, H., Mendez, G., Carbera, O., et Irassar, E. (2003) Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy. Cement and Concrete Research 33, 865-871.

- [Bouasker, M. et al. 2008] Bouasker, M., Mounanga, P., Turcruy, P., et Khelidj, A. L. A. (2008) Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions. *Cement and Concrete Composites* 30, 13-22.
- [Boubekeur. T., et al 2010] Boubekeur T, Boulekbache, B, et Makhelouf. A., (2010) Influence du laitier sur les propriétés des ciments à base de calcaire "SICZS_2010" Symposium International sur la Construction en Zone Sismique Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), 26 – 27 octobre.
- Boudchicha, A., Cheikh Zouaoui, M., Gallias, J.-L., et Mezghiche, B., (2007) Analysis of the effects of mineral admixtures on the strength of mortars, *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 13, N° 2:87-96 (ISSN 1392-3730).
- [Bouikni et al. 2009] Bouikni, A., Swamy, R.N., et Bali, A. (2009) Durability properties of concrete containing 50 % and 65 % slag. *Construct. Build. Mater.* 23(8), 2836–2845. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.040
- [Bouzabata. et Houari. 2008] Bouzabata. H., et Houari. H., (2008), Pathologie des constructions due à l'alcali-réaction en Algérie, Colloque National : Pathologie des constructions : du diagnostic à la réparation - Constantine 30-40.
- [Brooks, J., et al. 2000] Brooks, J., Megat Johari, M.A., et Mazloom, M. (2000) Effect of admixtures on the setting times of high strength concrete, *Cement & Concrete Composites*, 22 : 293-301.
- [Carles G. A. et Cyr M. 2002] Carles-Gibergues André et Cyr Martin (2002) Interpretation of expansion curves of concrete subjected to accelerated alkali–aggregate reaction (AAR) tests, *Cement and Concrete Research* 32(5) : 691-700. doi:10.1016/S0008-8846(01)00747-5
- [Chaid. R., et al., 2004] Chaid, R., Jauberthie, R., Bali, A., et Abadlia, M.T. (2004) Résistances mécaniques et chimiques des bétons à base de pouzzolane naturelle, 1er congrès international sur la technologie et la durabilité du béton, U.S.T.H.B, Alger, 35 p.
- [Chatterji 1979] Chatterji S., (1979) Role of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the breakdown of portland cement concrete due to alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, v 9, n 2, 185-188.
- [Chatterji et al., 1983] Chatterji S., Taulow N., Christensen, P. et Jensen, A.D., (1983) Studies of alkali-silica reaction with special reference to prevention of damage to concrete, *Proc. 6th International Conference on AAR in Concrete*, Copenhagen, Denmark, 1983, pp.253-260.
- [Chun-T.C et al. 2013] Chun-Tao Chen, Wei-Cheng Yang et Wen-Lin Chou (2013) Mitigation of alkali-silica reaction in mortar with limestone addition and carbonation, *The third international conference on sustainable construction materials and technologies*, Kyoto, Japan, pp 120-127.
- [Clark. L.A., et Ng. K.E., 1989] Clark. L.A., et Ng. K.E., (1989) Some factors influencing expansion and Strength of the SERC/BRE Standard ASR concrete mix, *Science and Engineering Research Council, Repair, Maintenance and Operations Conference*, London, Great Britain, pp. 89-94.
- [Cong et al. 1992] Cong, X., Gong, S., Darwin, D., McCabe, S.L. (1992) Role of silica fume in compressive strength of cement paste, mortar and concrete. *ACI Mater. J.* 89(4), 375–387
- [Daskiran et Daskiran. 2015] Daskiran Esma Gizem et Daskiran Mehmet Mustafa (2015) Effectiveness of Natural Zeolite in Mitigating Alkali Silica Reaction Expansions, *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering* Vol:9, No:9, 1131-1134.
- [Davraz. M., et Gunduz. L., 2008] Davraz. M., et Gunduz. L., (2008), Reduction of alkali silica reaction risk in concrete by natural (micronised) amorphous silica, *Construction and Building Materials* 22, 1093–1099. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.002
- [Douaïssia. Z., et Merzoud. M., 2018] Douaïssia. Z., et Merzoud. M., (2018), Contribution to the requalification of Alkali-Silica reaction damaged concrete : particular respect to the slag effect, *MATEC Web of Conferences* 149, 01053. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814901053>.
- [Dron R. 1974] Dron R. (1974) Mécanisme de la prise du laitier granulé sous activation alcaline, *Rapport de Recherches*, N° 38, L.C.P.C.

- [Dubosc. A., 1998] Dubosc. A. (1998) Avantage technique et économique de l'utilisation du laitier granulé en cimenterie, Colloque International sur l'utilisation des sous-produits et déchets industriels dans le génie civil, Paris, pp. 297-301.
- [Duchesne et Bérubé 1994] Duchesne J., et Bérubé M.A., (1994) Effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: another look at the reaction mechanisms. Part I: concrete expansion and portlandite depletion, *Cem. Concr. Res.*, v24, n 1, 73-82.
- [Dumas. M. É. 2019] Dumas Morin Étienne (2019) Étude sur la poudre de verre de source électronique et le contrôle de l'expansion due à la RAS dans les bétons architecturaux contenant des granulats de verre, Mémoire de maîtrise Spécialité : Génie civil, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil, 142 pages.
- [Dunster et al. 1990] Dunster, A.M., Kawano, H., et Nixon, P.J. (1990) The Effect of Silica Fume to Reduce Alkali-Silica reaction in Concrete, *Proceedings of the Fifth International Conference on Durability of Building Materials and Components*, (Ed. J.M. Baker, P.J. Nixon, A.J. Majumdar and H. Davies), E. & F.N. Spon, London, pp. 193-299.
- [El-Didamony, et El-Alfi, 1999] El-Didamony, H., et El-Alfi, E.S. (1999) Addition of limestone in the low heat Portland Cement Part 1. *Ceramics - Silikaty* 44, 109-113.
- [El-Didamony, et El-Alfi, 2000] El-Didamony, H., et El-Alfi, E.S. (2000) Addition of limestone in the low heat Portland Cement Part 2. *Ceramics - Silikaty* 44, 146-150.
- EN 1015-3 (1999) « Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – partie 3 : détermination de la consistance du mortier frais (à la table à secousses)».
- FD P18-456 (2004) Béton - Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction - Critères d'interprétation des résultats de l'essai de performance
- [Felekoglu B et al. 2006] Felekoglu 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 concrete research* Vol. 36, p. 1719-1726.
- [Fernandes et Broekmans 2013] Fernandes. I., et Broekmans. M.A.T.M., (2013), Alkali-Silica Reactions : An Overview. Part I, *Metallogr. Microstruct. Anal.* 2:257–267. doi : 10.1007/s13632-013-0085-5
- [Foroughi et al. 2012] Foroughi, M., Tabatabaei, R., et Shamsadeini, M., (2012) Effect of Natural Pozzolans on the Alkali-Silica Reaction of Aggregates in Real Concrete Specimens, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2(5)5248-5254.
- [Fournier et al. 1995] Fournier, B., Bilodeau, A. et Malhotra, V.M. (1995) CANMET/Industry research consortium on alkali-aggregate reactivity. *CANMET/ACI International Workshop on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete*, Natural Resources Canada, pp. 169-180.
- [Gao. X., 2010] Gao. X., (2010), Contribution à la requalification des structures endommagées par l'alcali réaction : Evaluation de l'avancement de l'alcali réaction dans les granulats, Thèse de Doctorat en Génie civil, université de Toulouse.
- [Ghassan et al 2013] Ghassan. K., Al-Chaar, Mouin Alkadi et Panagiotis G. Asteris (2013) Natural Pozzolan as a Partial Substitute for Cement in Concrete, *The Open Construction and Building Technology Journal*, 7, 33-42.
- [Ghrici, M. 2006] Ghrici, M. (2006) Etude des propriétés physico Mécaniques et de la durabilité des ciments à base de pouzzolane naturelle, Thèse de doctorat d'état en génie civil, USTMB d'Oran, Algérie.
- [Giaccio G., et al. 2008] Giaccio G., Zerbino R., Ponce J.M. et Batic O.R., (2008) Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, vol. 38, 993–1004.
- [Glasser 1992] Glasser F.P., (1992) Chemistry of alkali-aggregate reaction. *The alkali-silica reaction in concrete*, R.N. Swamy (ed), Van Nostrand Reinhold, New York, 30-53.
- [Gleize et al. 2003] Gleize, P.J.P., Müller, A., et Roman, H.R. (2003) Microstructural investigation of a silica fume-cement-lime mortar. *Cem. Concr. Compos.* 25(2), 171–175

- [Grattan-Bellew, 1991] Grattan-Bellew, P.E. (1991) Notes on Concrete Prism Test & ASTM C227 Mortar Bar Test, Petrography and Alkali-Aggregate Reactivity Course Manual, CANMET, Ottawa, pp. 125-161.
- [Guojun et al. 2018] Guojun Ke, Wengui Li, Ruyi Li, Yuelin Li and George Wang (2018) Mitigation Effect of Waste Glass Powders on Alkali-Silica Reaction (ASR) Expansion in Cementitious Composite, *International Journal of Concrete Structures and Materials* 12 (1) : 38-53., <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0299-7>
- [Hannachi, S., 2015] Hannachi Samia (2015) évaluation de la résistance a la compression du béton sur site : application de la méthode combinée, thèse Présentée pour l'obtention du diplôme de doctorat en sciences Spécialité : Matériaux, université Mentouri Constantine département de génie civil, 221 pages.
- [Heikal, M., et al. 2000] Heikal, M., EL-Didamony, H., et Morsy, MS. (2000) Limestone-filled pozzolanic cement, *Cement and Concrete Research*, 30 (12): 1827-34.
- [Hester et al. 2005] Hester, D., McNally, C., Richardson, M. (2005) A study of the influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete. *Construct. Build. Mater.* 19(9), 661–665
- [Hobbs D.W.,1989] Hobbs D.W.,(1989) Effect of mineral and chemical admixtures on alkali aggregate reaction. 8 th International Conference On Alkali Aggregate Reaction (ICAAR), Kyoto, Japan, 173–186
- [Hobbs, 1988] Hobbs, D.W. (1988) *Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Thomas Telford, London, 183 pages.
- [Hogan et Meusel. 1981] Hogan, F.J., Meusel, J.W. (1981) Evaluation for durability and strength development of a ground granulated blast furnace slag. *Cem. Concr. Aggreg.* 3(1), 40–52
- [Hooton, R.D. 1993] Hooton, R.D. (1993) Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack freezing and thawing, and alkali-silica reactivity. *ACI Mater. J.* 90(2), 143–152.
- [Hooton et Titherington 2004] Hooton, R.D., Titherington, M.P. (2004) Chloride resistance of high-performance concretes subjected to accelerated curing. *Cem. Concr. Res.* 34(9), 1561–1567.
- [Huang et Feldman, 1985] Huang, C.Y., et Feldman, R.F. (1985) Hydration reactions in Portland cement-silica fume blends. *Cem. Concr. Res.* 15(4), 585–592.
- [Hudec P.H., et Ghamari C., 2000] Hudec P.H et Ghamari C., (2000) Ground waste glass as an alkali silica reactivity inhibitor, 11ème ICAAR, Quebec, 663-72.
- [Hwang, CL., et Lin. CY., 1986] Hwang, C.L., Lin, CY., (1986) Strength development of blended blast Furnace slag cement mortars", 2nd International Conference on Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolan in Concrete, Farmington Hills, pp. 1323-1340.
- [Idir 2009] Idir R., (2009) Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique. Thèse de doctorat, Institut national des sciences de Toulouse, 292 p.
- [Idir et al. 2010] Idir R., Cyr M., Tagnit-Hamou A., (2010) Can we massively reuse glass in concrete ? Properties of glass concrete. *Verre*, 16(5), p. 70-77.
- [Inoue. S., et al., 1989] Inoue. S., Fuji. M., Kobayashi. K., et Nakano. K., (1989) Structural behaviors of reinforced concrete beams affected by Alkali-Silica Reaction, 8th international Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, pp.727-732.
- [Jin et al., 2000] Jin, C., Meyer, C. et Baxter, S. (2000) Glasscrete - Concrete with glass aggregate, *American concrete institute, Material Journal*, n°97, p.208-213.
- [Jones et Clark 1998] Jones A. E. K. et Clark L. A., (1998) The effects of ASR on the properties of concrete and the implications for assessment, *Engineering Structures*, Vol 20 (9), 785 – 791
- [Kaid, N., et al. 2009] Kaid, N., Cyr, M., Julien, S., et Khelafi, H. (2009) Durability of concrete containing a natural pozzolan as defined by a performance- based approach, *Construction and Building Materials*, 23(12) : 3457–3467.

- [Kakali, G., et al. 2000] Kakali, G., Tsivilis, S., Aggeli, E., et Bati, M. (2000) Hydration products of C₃A, C₃S and Portland cement in the presence of CaCO₃, *Cement and Concrete Research*, 30 (7) : 1073-7.
- [Kandasamy. et Shehata. 2014], Kandasamy. S., et Shehata. M. H., (2014), The capacity of ternary blends containing slag and high-calcium fly ash to mitigate alkali silica reaction, *Cement & Concrete Composites* 49, 92-99.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.008>
- [Kaplan 1959] Kaplan. M.F., (1959) The effect of age and water to cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete, *mag. Concrete, res.*, 11(32), 85.
- [Kateb. 2009] Kateb Mohamed Lamine (2009), Utilisation des granulats de verre dans la fabrication des bétons architecturaux «cas des briques en béton». *Memoire de maitrise es sciences appliquées, Spécialité : génie civil , Université de Sherbrooke*, 147 pages.
- [Kaveh et Prasada 2015] Kaveh Afshinnia et Prasada Rao Rangaraju (2015) Effectiveness of ground glass powder from recycled glass in mitigating alkali-silica reaction in concrete, *Journal of the Transportation Research Board*, Vol 2508, Issue 1 : 65 - 72, <https://doi.org/10.3141/2508-08>
- [Kenai, S., et al. 2004] Kenai, S., Soboyejo, W., et Soboyejo, A. (2004) Some Engineering Properties of Limestone Concrete. *Materials and Manufacturing Processes* 19, 949-961.
- [Kohno K., et al. 1989] Kohno K., Sugimoto A., et Kashiwai T., (1989) Effects of Finely Ground Silica, Silica Fume and Red Mud on Alkali-Silica Reaction and Concrete Strength, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, pp 247-252.
- [Köksal et al. 2008] Köksal, F., Altun, F., Yigˆit, I., Sˆuhin, Y. (2008) Combined effect of silica fume and steel fibre on the mechanical properties of high strength concretes. *Construct. Build. Mater.* 22(8), 1874–1880 .
- [Kouloumbi, N., et al. 1995] Kouloumbi, N., Batis, G., et Pantasopoulou, P. (1995) Efficiency of natural Greek pozzolan in chloride-induced corrosion of steel reinforcement, *Cement Concrete Aggregate*, 17(1) : 18-25.
- [Kwon. 2005] Kwon, Y. (2005) A study on the alkali-aggregate reaction in high-strength concrete with particular respect to the ground granulated blast-furnace slag effect. *Cem. Concr. Res.* 35(7), 1305–1313
- [Kwon. Y.J., 2005] Kwon. Y.J., (2005) A study on the alkali-aggregate reaction in high-strength concrete with particular respect to the ground granulated blast-furnace slag effect, *Cement and Concrete Research* 35, 1305-1313. doi:10.1016/j.cemconres.2004.09.021
- [Larive C, et al. 1996] Larive C, Laplaud A., et Joly M., (1996), Behaviour of AAR-affected concrete, experimental data, 10th international Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Melbourne, Australia, pp. 670-677.
- [Larive C., 1997] Larive C., (1997) Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alkali réaction et de ses effets mécaniques, thèse Doctorat ENPC, Paris, Publicatio ouvrages d'art. OA 28. LCPC Ed.
- [Lawrence, P., 2000] Lawrence, P., (2000) Sur l'activité des cendres volantes et des additions chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires. *Mémoire de thèse Université Paul Sabatier - Toulouse III*.
- LCPC (1994) *Recommandations pour les préventions des désordres dus à l'alkali-réaction*, Guide technique.
- [Lee G., et al. 2011] Lee G., Ling T.C., Wong Y.L., et Poon C.S. (2011) Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks. *Constr. Build. Mater.*, 25: 2611–2618. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.008.
- [Liu C.X., et al. 2012] Liu C.X., Chen G.X., Ji G.J., et Wang X.J. (2012) The effect of temperature on alkali-silica reaction. *China Concr. Cem. Prod.* 191 : 1–4.
- [Liu S.H., et al. 2015] Liu S.H., Xie G.S., et Wang S. (2015) Effect of curing temperature on hydration properties of waste glass powder in cement-based materials. *J. Therm. Anal. Calorim.* 119:47–55. doi: 10.1007/s10973-014-4095-6.

- [Livesy, P. 1991] Livesy, P. (1991) Strength Characteristics of Portland-limestone cements. *Construction and Building Materials* 5, 147-150.
- [Lothenbach, B., et al. 2008] Lothenbach, B., Saout, G. L., Gallucci, E., et Scrivener, K. L. (2008) Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research* 38, 848-860.
- [Maltais, Y. 1996] Maltais, Y. (1996) Étude de l'évolution du degré d'hydratation de ciments et du développement des résistances mécaniques de mortiers et de bétons soumis à différentes températures de mûrissement, Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 188p. University Press, pp. 73-99.
- [Massazza. F., 1993] Massazza, F. (1993) Pozzolanic cements, *Cement & Concrete Composites* 15(4): 185-214.
- [Matschei, T et al. 2007] Matschei, T., Lothenbach, B., et Glasser, F. (2007) The role of calcium carbonate in cement hydration, *Cement and Concrete Research* 37, 551-558.
- [Mebrouki, A., et al. 2004] Mebrouki, A., Belas Belaribi, N., Bouhamou, N., et Cyr, M. (2004) Contribution à l'étude de l'influence de la pouzzolane de BENI-SAF sur les caractéristiques mécaniques des mortiers, 1er congrès international sur la technologie et la durabilité du béton, U.S.T.H.B, Alger, 28 p.
- [Mehta. 1986] Mehta, P.K. (1986) *Concrete : Structure, Properties and Materials*, Prentice Hall, Englewood Cliffs
- [Meyer et Baxter 1997] Meyer, C. et Baxter, S. (1997) *Use of Recycled Glass for Concrete Masonry Blocks Final Report*, Albany, New York: New York State Energy Research and Development Authority, 97-15.
- [Mirzahosseini et Riding 2014] Mirzahosseini M.R., et Riding K.A. (2014) Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as new supplementary cementitious material (SCM) *Ceme. Concr. Compos*, 56 : 95–105. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.10.004.
- [Moisson. M. 2005] Moisson Mac (2005) Contribution à la maîtrise de la réaction alcali silice par ajout de fines de granulats réactifs dans le béton, These présenté en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Spécialité : Génie civil, 211 pages.
- [Monteriro et al. 1997] Monteriro P.J.M., Wang K., Sposito G., dos Santos M.C., de Andrade W.P., (1997) Influence of mineral admixtures on the alkali-aggregate reaction, *Cem. Concr. Res.*, v 27, n 12, 1899-1909.
- NA 442 (2005) « Ciment, composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ».
- [Nacéri. A., et Benia. M., 2006] Nacéri, A., Benia, M. (2006) The effect of fineness of cements at minerals admixtures on the mechanical response of mortar, *Asian Journal of Civil Engineering*, 7(3) : 239-48.
- [Nacéri et Messaoudene 2006] Nacéri, A., et Messaoudene, I. (2006) The chemical and physical effects of the granulated blast furnace slag on concrete compressive strength, *World Journal of Engineering*, 3(3) : 43-51.
- NF EN 1008 (2003) « Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton ».
- NF EN 1097-2 (1999) Indice de classement : P 18-650-2, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation.
- NF EN 1097-3 (1998) Indice de classement : P 18-650-3, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 3 : Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire.
- NF EN 1097-6 (1999) Indice de classement : P 18-650-6, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.
- NF EN 12350-2 (1999) « Essai pour béton frais. Partie 2: Essai d'affaissement ».
- NF EN 12350-6 (2012) « Essai pour béton frais - Partie 6 : masse volumique ».

- NF EN 12390-1 (2001) « Essai pour béton durci, Partie 1: Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux Moules, Indice de classement P 18-430 ».
- NF EN 12390-2 (2001) « Essai pour béton durci, Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, Indice de classement P 18-438 ».
- NF EN 12390-3 (2012) « Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes ».
- NF EN 12390-5, «Essais pour béton durci - Partie 5 : Résistance à la flexion des éprouvettes ».
- NF EN 12390-7, « Essais pour béton durci - Partie 7 : Masse volumique du béton durci ».
- NF EN 12504-4 (2005) Essais pour béton dans les structures –Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son.
- NF EN 196-1 (1995) Indice de classement : P 15-471, Méthodes d'essais des ciments, Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques.
- NF EN 196-3 (1995) Indice de classement : P 15-473, Méthodes d'essais des ciments, Partie 3:détermination du temps de prise et de la stabilité.
- NF EN 197-1 & NF EN 197-1/A3 (2009) Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. Normalisation Française. Indice de classement : P 15-101-1.
- NF EN 933-8 (1999) Indice de classement : P 18-622-8, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, Partie 8 : Évaluation des fines - Équivalent de sable.
- NF EN 934-2 (2012) « Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton, définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage ».
- NF P 18-454 (2004) Béton, Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali réaction, Essai de performance.
- NF P18-560 (1990) Granulats, Analyse granulométrique par tamisage.
- [Nishikawa et al., 1995] Nishikawa, T., Takatsu, M. et Daimon, M. (1995) Fracture behavior of hardened cement paste incorporating mineral additions, *Cement and concrete research*, vol.25, n°6, p.1218-1224.
- [Nixon P.J., et Page C.L., 1987] Nixon P.J., et Page C.L., (1987) Pore solution chemistry and alkali aggregate reaction, in : *Proceedings of the Katherine and Bryant Mathers International Conference on Concrete Durability*, Atlanta, USA, ACI SP-100, pp 1833-1862.
- [Oberholster, 1989] Oberholster, R. E. (1989) Alkali-aggregate reaction in South Africa : Some recent developments in research. *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali- Aggregate Reaction*, Kyoto, pp 77-82.
- [Ohno. S., et al. 1989] Ohno. S., Yoshioka. Y., Shinozaki. Y., et Morikawa. T., (1989) The mechanical behaviour of beams coated after Alkali-Silica Reaction damage, *8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Kyoto, Japan, pp.697-702.
- [Park, C.K., et al. 2005] Park, C.K., Noh, M.H., Park, T.H. (2005) Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixture, *Cement and Concrete Research*, 3: 842- 9.
- [Park. L et al. 2004] Park, S. B., Lee, B. C. et Kim J H. (2004) Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate, *Cement and Concrete Research* vol. 34, n° 12, p. 2181–2189
- [Pattengil et Shutt 1973] Pattengil, M. et Shutt T.C. (1973), Use of ground glass as a pozzolan; *Albuquerque Symposium on Utilisation of Waste Glass in Secondary Products*. Albuquerque, New Mexico, U.S.A., p. 137–153.
- [Perra, J., et al. 1999] Perra, J., Husson, S., et Guilhot, B. (1999) Influence of finely ground limestone on cement hydration. *Cement and Concrete Composites* 21, 2, 99-105.
- [Perry et Gillott, 1985] Perry, C. et Gillott, J. E. (1985) The Feasibility of Using Silica Fume to Control Concrete Expansion Due to Alkali-Aggregate Reaction, *Durability of building materials*, Vol. 3, pp. 133-146.

- [Pike et al., 1960] Pike, R.G., Hubbard, D. et Newman, E.S. (1960). Binary silicate glasses in the study of alkali-aggregate reaction, Highway Research Board Bulletin, n°275, p.39-44.
- [Pleau, R., et al., 1989] Pleau, R., Bérubé, M.A., Pigeon, M., Fournier, B. et Raphael, S., (1989) Mechanical behavior of concrete affected by ASR. 8 th International Conference On Alkali Aggregate Reaction (ICAAR), Kyoto, 721 – 726.
- [Poyet. S., 2003] Poyet. S., (2003), Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints par la réaction alcali-silice : Approche expérimentale et modélisation numérique multi-échelles des dégradations dans un environnement hydro-chemo-mécanique variable, Thèse de Doctorat en Génie civil, Université de Marne-La-Vallée.
- [Qian et al. 1994] Qian C., Guo H., et Tang M., (1994) Mechanism of mineral admixture suppressing alkali-silica reaction: part I, corrosion degree of reactive aggregate in blended cement pastes and its correlations with expansion value and electric resistance change, Cem. Concr. Res., vol24, n 6, 1111-1120.
- [Ramachandran. V. et Zhang. C 1986] Ramachandran, V., et Zhang, C. (1986) Hydration kinetics and microstructural development in the $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{-CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ system. *Materiaux et constructions. Materials and Structures* 19, 437- 444.
- [Ramlochan et al, 2000] Ramlochan, T., Thomas, M. et Gruber, K. (2000). The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, 339-344.
- [Rao. G.A. 2003] Rao. G.A. (2003) Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars. *Cem. Concr. Res.* 33(11), 1765–1770.
- [Regourd M., 1986] Regourd M., (1986) Slag and slag cements, *Cement Replacement Materials*, In: R.N. Swamy, Editor, *Slags and Slag Cement, Concrete Technology and Design* vol. 3, Surrey University Press, pp. 73-99.
- [Riche. J., 2003] Riche. J., (2003), La réaction alcali-silice : Approche cinétique et mécanisme d'expansion (Etude du système silice-chaux-potasse à 80°C), Thèse de Doctorat en Génie civil, Université des sciences et technologie de Lille.
- [Rigden S. R., et al, 1995] Rigden S. R., Majlesi Y., et Burley E., (1995) Investigation of factors influencing the expansive behaviour, compressive strength and modulus of rupture of alkali-silica reactive concrete using laboratory concrete mixes, *Magazine of Concrete Research*, vol. 47, no. 170, pp. 11-21.
- [Rodriguez. C., 1998] Rodriguez-camacho (1998) Using natural pozzolans to improve the sulfate resistance of cement mortars, In Malhotra VM, editors, *International conference*, Bangkok, Thailand, ACI SP-178: 1021-39.
- [Sandvik et Gjorv 1992] Sandvik, M., et Gjorv, O.E. (1992) Prediction of strength development for silica fume concrete. *Proceedings of 4th International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Istanbul, Turkey. ACI Special Publication 132, 987–996
- [Schiller. B. et Ellerbrock, H.G. 1992] Schiller, B., et Ellerbrock, H.G. (1992) The Grinding and Properties of Cement with Several Main Constituents. *Zement-Kalk-Gips* 45, 325-334.
- [Schmidt et al., 1963] Schmidt, A. et Saia, W.H.F. (1963). Alkali-aggregate reaction tests on glass used for exposed aggregate wall panel work. *American concrete institute, Material Journal*, n° 60, p.1235-1236.
- [Schmidt, M. 1992] Schmidt, M. (1992) Cement with Interground Additives-Capabilities and Environmental Relief. *Zement-Kalk-Gips* 45, 296-301.
- [Schwarz et al. 2008] Schwarz, N et 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*, vol. 38, n°4, p.429-436
- [Semcha. A., 2006] Semcha, A. (2006) Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug, Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne- Ardenne, 105 p.
- [Senhadji, Y. (2006] Senhadji, Y. (2006) L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques), Mémoire de magistère en génie civil, USTMB d'Oran, Algérie.
- [Shafaatian. S.M.H., et al. 2013] Shafaatian. S.M.H., Akhavan. A., Maraghechi. H., et Rajabipour. F., (2013), Howdoes fly ash

- mitigate alkali–silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)?, *Cement & Concrete Composites* 37, 143-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.004>.
- [Shao et al. 2000] Shao, Y., Lefort, T., Moras, S. et Rodriguez, D. (2000) Studies on concrete containing ground waste glass, *Cement and Concrete Research*, vol. 30, n° 1, p. 91-100.
- [Shayan et Xu 2002] Shayan, A. et Xu, A. (2002) Value-added utilization of waste glass in concrete, IABSE symposium, Melbourne, p.1-11.
- [Shayan et Xu 2004] Shayan, A. et Xu, A. (2004) Value-added utilisation of waste glass in concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n°1, p.81-89.
- [Shayan et Xu 2006] Shayan, A. et Xu, A. (2006) Performance of glass powder as a pozzolanic material a field trial on concrete slabs, *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n°2, 457-468.
- [Shayan. A. et Ivanusec. I. 1989] Shayan. A. et Ivanusec. I. (1989) Influence du NaOH sur les propriétés mécaniques de la pâte et du mortier de ciment avec et sans granulat réactif. 8^{ème} Conférence internationale sur la réaction alcali-agrégat, Kyoto, Japon. 715-720. <http://hdl.handle.net/102.100.100/261248?index=1>
- [Shi et al., 2005] Shi, C., Wu, Y. , Riefler, C. et Wang, H. (2005) Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, *Cement and Concrete Research*, vol.35, n° 5, p. 987- 993.
- [Shuaicheng et al. 2018] Shuaicheng Guo, Qingli Dai, Xiao Sun, Xianghui Xiao, Ruizhe Si et Jiaqing Wang (2018) Reduced Alkali-Silica Reaction Damage in Recycled Glass Mortar Samples with Supplementary Cementitious Materials, *Journal of Cleaner Production*, Volume 172, Pages 3621-3633, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.119>
- [Siddique. R., Khan. M.I. 2011] Siddique. R., Khan. M.I. (2011), *Supplementary Cementing Materials*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-17866-5.
- [Soroka et Stern, 1976] Soroka. I., et Stern. N. (1976) Calcareous fillers and the compressive strength of Portland Cement. *Cement and Concrete Research* 6, 367-376.
- [Stanton. 1940] Stanton T.E., (1940) Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, *Am. Soc. of Civil Engineers Papers*, 1781-1811.
- [Sturup et al. 1984] Sturup. V.R, Vechio. R.J, Caratin H., (1984) Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength, *ACI SP 82-11*, American concrete institute, Farmington hills, MI.
- [Stutzman. P., 2004] Stutzman, P. (2004) Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement microstructure, *Cement and Concrete Composites*, 26: 957-966.
- [Swamy et Al-Asali 1986] Swamy R. N., et Al-Asali M. M., (1986) influence of alkali-silica reaction on the engineering properties of concrete, *Alkalis in concrete*, éd. V. H. Dodson, STP930 American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 69-86.
- [Swamy et Al-Asali 1989] Swamy R.N. and Al-Asali M.M., (1989) Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction, *American Concrete Institute Materials journal* vol.85, 367 – 374
- [Tagnit. H.A., et al. 2003] Tagnit-hamou, A., Pertove, N., et Luke, K. (2003) Properties of concrete containing diatomaceous earth, *ACI Mater. J.*, 100 (1): 73-8.
- [Taylor. 1997] Taylor, H.F.W. (1997). *Cement chemistry*. 2nd ed. Thomas Telford.
- [Tezuka, Y., et al. 1992] Tezuka, Y., Gomes, D., Martins, D., et Djanikin, J. (1992) Durability aspects of cement with high limestone filler content. In *Proceedings of the 9th International Congress of the Chemistry of Cement (New Delhi) 9th International Congress of the Chemistry of Cement*, pp. 53-59.
- [Thomas. M.D.A., et al. 2013] Thomas. M.D.A., Fournier. B., Folliard. K.J. (2013), *Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book*, The Transtec Group, Inc.,

- [Tikalsky, P., et Freeman, R.L. 1998] Tikalsky, P., Freeman, R.L. (1998) The effect of pouzzolan and slag on the resistance of concrete, Master's Thesis, University of Texas, 112 p.
- [Topçu et Canbaz, 2004] Topçu, İ. B. et Canbaz, M. (2004). Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 267-274.
- [Turriziani 1986] Turriziani R., (1986) Internal degradation of concrete : alkali-aggregate reaction, reinforcement steel corrosion, in: *Proceedings of the 8th International Conference on Chemistry of Cement*, Rio de Janeiro, Brazil, 388-437.
- [Uchikawa 1986] Uchikawa H., (1986) Effect of blending components on hydration and structure formation , in: *Proceedings of 8th International Conference on Chemistry of Cement*, Rio de Janeiro, Brazil, pp.249-280.
- [Wang H., et Gillott J.E., 1991-a] Wang H., Gillott J.E., (1991 a), Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide, *Cement and Concrete Research*, vol. 21, pp. 647-654.
- [Wang H., et Gillott J.E., 1991-b] Wang h., Gillott J.E., (1991 b), Effect of Ca(OH)₂ on alkali-silica reaction, *Magazine of Concrete Research*, vol. 43, no. 156, , pp. 215-218.
- [Wood J. G. M., et al. 1989] Wood J. G. M., Norris P., Leek D., (1989) Physical behaviour of AAR damaged concrete in structures in test conditions, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, pp. 765-770.
- [Xie et al. 2003] Xie, Z., Xiang, W. et Xi, Y. (2003) ASR Potentials of Glass Aggregates in Water-Glass Activated Fly Ash and Portland Cement Mortars, *Journal of Materials in Civil Engineering*, p.67-74.
- [Xiong Q. 2006] Xiong Q. (2006) Master's Thesis. Southwest Jiaotong University; Chengdu, China: Apr, 2006. The Testing Method and Suppressing Measure of Alkali Aggregate Reaction.
- XP P 18-594 (2004) Granulats - Méthodes d'essai de réactivité aux alcalis.
- [Xu et al. 1995] Xu G.J.Z., Watt D.F., Hudec P.P, (1995) Effectiveness of mineral admixtures in reducing ASR expansion, *Cem. Concr. Res.*, Vol 25, n 6,1225-1236.
- [Xu et Hooton 1993] Xu Z., et Hooton R.D., (1993) Migration of alkali ions in mortar due to several mechanisms, *Cem. Concr. Res.*, 951-961.
- [Yamada et Ishiyama 2005] Yamada, K. et Ishiyama, S. (2005). Maximum dosage of glass cullet as fine aggregate mortar. Dans *Achieving Sustainability in Construction: Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee*, Scotland, UK on 5-7 July 2005 London, Thomas telford Ltd, p.185-192.
- [Yazici. 2008] Yazıcı, H. (2008) The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete. *Construct. Build. Mater.* 22(4), 456 - 462
- [Zachariassen 1932] Zachariassen, W. H. (1932). The atomic arrangement in glass, *Journal of the American chemical society*, vol. 54, p.3841-3851
- [Zubair. M., 2018] Zubair Lall Mahomed (2018) Alkali-aggregate reaction in western cape concrete, University of Cape Town, Thesis of master of science in structural engineering and structural materials specialisation, The faculty of engineering and the built environment, Department of civil engineering, 135 p.