

UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB - BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géo matériaux et Génie Civil

THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité Génie Civil

**RETRAIT D'UN BAP A BASE DE POUZZOLANE
NATURELLE ET LAITIER DE DIFFERENTES FINESSES**

Par

Sihem Hammat

Devant le jury composé de :

Mr B. Menadi	Professeur, Université de Blida 1	Directeur de thèse
Mr S. Kenai	Professeur, Université de Blida 1	Co-directeur
Mr K. Grine	Professeur, Université de Blida 1	Président
Mr O. Boukendakdji	Professeur, Université de Médéa	Examineur
Mr T. Boubekour	MCA, Université de Tissemsilt	Examineur
Mr L. Hariche	MCA, Université de Djelfa	Examineur

Blida, 2023

RESUME

Les bétons autoplaçants (BAP) se caractérisent par une forte fluidité, permettant leur mise en place sans vibration tout en restant stables et homogènes. Leur formulation est critique aux termes de constituants et dosages, dont un volume de pâte élevé est indispensable. La protection de l'environnement par la diminution de la consommation des ressources naturelles et la réduction de la pollution est aujourd'hui un aspect important dans la fabrication du béton. L'utilisation des additions minérales dans la composition du béton peut être une solution pour diminuer les émissions de CO₂ et d'autre part d'obtenir un liant moins coûteux.

La présente étude vise à apporter une contribution à la valorisation de la pouzzolane naturelle et du laitier de hauts fourneaux en tant que substitut partiel au ciment dans la composition des mortiers autoplaçants (MAP). L'influence de la teneur de substitution ainsi que l'effet de la surface spécifique de l'addition minérale utilisée sont étudiés. Le ciment est partiellement substitué par 15% et 30% de laitier (L) et de pouzzolane naturelle (PN), séparément. Les additions minérales sont broyées à trois finesses différentes : 350 m²/kg, 420 m²/kg et 500 m²/kg.

Les résultats obtenus prouvent que la substitution du ciment par du laitier a un effet positif sur l'ouvrabilité et les propriétés rhéologiques des MAP. Cependant, la présence de pouzzolane naturelle dans les compositions de MAP entraîne une augmentation des paramètres rhéologiques. L'augmentation de la surface spécifique du laitier offre des meilleures propriétés rhéologiques. Un effet contraire est observé avec l'accroissement des finesses de la pouzzolane naturelle. Une amélioration des résistances en compression est observée à long terme avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par le laitier ou de la pouzzolane. L'augmentation de la surface spécifique des additions minérales a un effet bénéfique sur le développement des résistances à long terme. L'incorporation du laitier dans les compositions de MAP génère une diminution du retrait total et une augmentation du retrait endogène pour des finesses de 420 m²/kg et 500 m²/kg. Cependant, pour une finesse de pouzzolane naturelle de 500 m²/kg, une augmentation du retrait total par rapport au mortier témoin est observée. L'absorption capillaire d'eau des MAP diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier et augmente avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane.

Mots clés : Mortier autoplaçant, Laitier, Pouzzolane naturelle, Finesse, Retrait.

ABSTRACT

Self-compacting concretes (SCC) are characterized by their high fluidity, allowing them to be placed without vibration while remaining stable and homogeneous. Their mix design is critical in terms of constituents and dosages, of which a high volume of paste is essential. Protecting the environment by reducing the consumption of natural resources and pollution is an important aspect to consider in concrete manufacturing. The use of mineral addition in concrete mixtures may be a solution to reduce CO₂ emissions and on the other hand to obtain a less expensive binder.

The present study aims to contribute to the valorization of natural pozzolana (NP) and blast furnace slag (S) as partial substitutes for cement in the composition of self-compacting mortars. The influence of the substitution content as well as the effect of the specific surface area of the mineral addition used is studied. The cement is partially substituted with 15% and 30% of slag and natural pozzolan separately. The mineral additions are ground to three different fineness levels: 350 m²/kg, 420 m²/kg and 500 m²/kg.

The results show that replacing cement with slag has a positive effect on the workability and rheological properties of SCM. However, the presence of natural pozzolana in SCM compositions increases the rheological properties. Increasing the specific surface area of slag provides better rheological properties. A contrary effect is observed with higher fineness of natural pozzolana. At long term, an improvement in compressive strength is observed with an increase in slag or natural pozzolana content. The increase in the specific surface area of mineral additions has a beneficial effect on the development of compressive strength at later age. The incorporation of slag in SCM compositions leads to a decrease in total shrinkage and an increase in autogenous shrinkage for fineness levels of 420 m²/kg and 500 m²/kg. However, in the case of natural pozzolana, an increase in total shrinkage is observed for a fineness level of 500 m²/kg. Furthermore, the addition of slag reduces capillary water absorption of SCM, while it increases with increasing pozzolana content.

Keywords: Self-compacting mortar, Slag, Natural pozzolana, Finenesses, Shrinkage.

ملخص

تتميز الخرسانة ذاتية التوضع بسيولة عالية، مما يسمح بوضعها دون اهتزاز مع الحفاظ على استقرارها وتجانسها . صياغتها حاسمة من حيث المكونات والتراكيز، حيث يجب ان تحتوي على تركيز عالي من العجينة الأسمنتية. تعتبر حماية البيئة من خلال الحد من استهلاك الموارد الطبيعية وتقليل التلوث من الجوانب المهمة التي يجب اخذها بعين الاعتبار عند تصنيع الخرسانة. يمكن أن يكون استخدام الإضافات المعدنية في تكوين الخرسانة حلاً لتقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون ومن ناحية أخرى للحصول على مادة رابطة أقل تكلفة.

تهدف هذه الدراسة إلى المساهمة في تقييم تأثير البوزولان الطبيعي وفضلات الأفران العالية كبديل جزئي للإسمنت في تركيب الملاط الذاتي التوضع. تمت دراسة تأثير نسبة الاستبدال وكذلك تأثير درجة نعومة الإضافات المعدنية المستخدمة. تم استبدال الإسمنت جزئياً بـ 15% و 30% بفضلات الأفران و البوزولان الطبيعي، بشكل منفصل. تم طحن الإضافات المعدنية إلى ثلاث درجات نعومة مختلفة ، 350 م² / كغ ، 420 م² / كغ و 500 م² / كغ.

تثبت النتائج التي تم الحصول عليها أن استبدال الإسمنت بفضلات الأفران له تأثير إيجابي على الخصائص في الحالة الطازجة و العوامل الريولوجية للملاط المرصوص ذاتياً. على العكس، فإن وجود البوزولان الطبيعي في تركيبات الملاط زاد من الخواص الريولوجية. الزيادة في درجة نعومة فضلات الأفران توفر خصائص ريولوجية أفضل. بينما أظهرت النتائج التجريبية تأثير معاكس مع زيادة نعومة البوزولان الطبيعي. لوحظ تحسن في مقاومة الانضغاط على المدى الطويل مع زيادة نسبة استبدال الإسمنت بالخبث أو البوزولان. الزيادة في درجة نعومة الإضافات المعدنية لها تأثير إيجابي على تطوير مقاومة الضغط على المدى الطويل. تؤدي إضافة خبث الأفران إلى انخفاض في الانكماش الكلي وزيادة في الانكماش الداخلي لدرجات نعومة تبلغ 420 م² / كغ و 500 م² / كغ. بالنسبة إلى نعومة البوزولان الطبيعي البالغة 500 م² / كغ ، لوحظ زيادة في الانكماش الكلي مقارنة بالملاط دون إضافات. يقل امتصاص الماء مع زيادة محتوى الخبث في تركيبات الملاط ويزيد مع زيادة النسبة المئوية للبوزولان.

الكلمات المفتاحية : الملاط المرصوص ذاتياً، فضلات الأفران، البوزولان الطبيعي، درجة النعومة، الإنكماش.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été réalisé au sein du Laboratoire de Géomatériaux et de Génie Civil à la Faculté de technologie de l'Université Saad Dahlab Blida 1.

Tout d'abord, je remercie le bon dieu ALLAH de m'avoir donné du courage et la patience pour réaliser ce modeste travail.

J'adresse mes vifs remerciements à mon directeur de thèse Monsieur Menadi Belkacem, Professeur à l'Université de Saad Dahlab Blida 1, qui m'a donné l'opportunité d'effectuer ce travail. Je tiens également à le remercier pour sa gentillesse, sa modestie et sa grande disponibilité. Le partage de l'ensemble de ses connaissances m'a toujours permis de travailler dans les meilleures conditions. Je le remercie pour le temps qu'il a consacré pour nous corriger. Qu'il trouve ici l'expression de ma respectueuse gratitude.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon co-directeur de thèse Monsieur Kenai Said, Professeur à l'Université de Saad Dahlab Blida 1, qui m'a accueilli dans son laboratoire et qui m'a donné l'opportunité d'effectuer ce travail, de ses conseils scientifiques tout au long de la thèse, sa grande disponibilité, ses encouragements et de la confiance qu'il m'a accordée. Je le remercie pour le temps qu'il a consacré pour corriger ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma respectueuse gratitude.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur El Hadj Kadri, professeur à l'Université de Cergy-Pontoise pour sa collaboration scientifique et pour l'orientation apportée pour l'élaboration de cette recherche.

J'exprime à tous les membres du jury toute ma gratitude pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant d'examiner notre travail :

- ◆ Monsieur K. Grine, Professeur à l'Université de Blida 1, président du jury ;
- ◆ Monsieur O. Boukendakdji, Professeur à l'Université de Médéa, examinateur ;
- ◆ Monsieur T. Boubekour, Professeur à l'Université de Tissemsilt, examinateur ;
- ◆ Monsieur L. Hariche, Maître de conférences à l'Université de Djelfa, examinateur ;

J'associe également mes remerciements à monsieur Fortas Abdelkader, laborantin de laboratoire de Géo-matériaux du département de Génie Civil de l'Université Saad Dahlab Blida 1. Je voudrais également remercier mes collègues de travail, Yahiaoui Walid, Kouiderdjelloul Omar et Debbih Amina. Ce fut un grand plaisir d'avoir travaillé avec vous. Merci pour votre soutien. Je tiens également à remercier tous les enseignants de département de Génie civil qui ont contribué à ma formation.

Mes remerciements s'adressent aussi à ma petite famille et en particulier mes parents et mon époux qui m'ont soutenu durant des années pour pouvoir effectuer ce travail. Enfin, je souhaite remercier tous ceux qui, par leur aide et par leur encouragement, m'ont permis de réaliser cette modeste thèse.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	2
Remerciements.....	5
Table des matières	7
Liste des figures	11
Liste des tableaux.....	17
Liste des symboles et des abréviations	18
Introduction générale	20
CHAPITRE 1 : Généralités et propriétés des bétons et mortiers autoplaçants à l'état frais.....	23
1.1. Introduction.....	23
1.2. Définition et Avantages.....	23
1.3. Caractérisation des BAP et MAP à l'état frais.....	24
1.3.1. Propriétés des BAP à l'état frais.....	24
1.3.2. Facteurs influençant les propriétés des BAP et MAP à l'état frais.....	27
1.4. Formulation des BAP.....	32
1.4.1. Approche Japonaise.....	33
1.4.2. Approche suédoise (CBI).....	34
1.4.3. Approche du LCPC.....	35
1.5. Comportement rhéologique des BAP.....	36
1.5.1. Fluides newtoniens.....	36
1.5.2. Fluides non newtoniens.....	37
1.5.3. Paramètres rhéologique.....	40
1.5.3.1: Viscosité.....	40
1.5.3.2: Contrainte de cisaillement.....	41
1.5.3.3: Vitesse de cisaillement.....	41
1.5.3.4: Seuil de cisaillement.....	42

1.6. Influences des additions minérales sur les propriétés des BAP et MAP à l'état frais...	42
1.6.1. Influence de la nature et la teneur des ajouts minéraux.....	43
1.6.2. Influence de la finesse des ajouts minéraux.....	56
1.7. Conclusion.....	59

CHAPITRE 2: Influence des additions minérales sur les performances des mortiers et bétons..... 61

2.1. Introduction.....	61
2.2. Mécanisme d'hydratation des ciments.....	61
2.3. Influence des additions minérales sur les propriétés mécaniques des BAP et MAP...63	
2.3.1. Résistance à la compression.....	63
2. 3.2. Résistance à la traction.....	75
2.4. Influence des additions minérales sur le retrait des BAP et MAP.....	80
2.4.1. Retrait de dessiccation (séchage).....	81
2.4.2. Retrait endogène.....	86
2.4.3. Retrait plastique.....	96
2.5. Influence des additions minérales sur la durabilité des mortiers et bétons autoplacants.100	
2.5.1. Porosité.....	100
2.5.2. Absorption capillaire.....	102
2.5.3. Perméabilité.....	108
2.5.4. Diffusion des ions chlorures.....	111
2.6. Conclusion.....	113

CHAPITRE 3: Matériaux, formulation et méthodes d'essais.....115

3.1. Introduction.....	115
3.2. Caractéristiques des matériaux utilisés.....	115
3.2.1. Ciment.....	115
3.2.2. Additions minérales.....	116

3.2.2.1: Pouzzolane naturelle.....	118
3.2.2.2: Laitier.....	119
3.2.3. Sable.....	119
3.2.4. Le superplastifiant.....	120
3.2.5. L'eau de gâchage.....	120
3.3. Formulation et confection du mortier autoplaçant.....	120
3.4. Essais relatifs au MAP à l'état frais.....	122
3.4.1. Essai d'étalement au Mini-Cône.....	122
3.4.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel).....	122
3.4.3. Essai au rhéomètre.....	123
3.5. Essais relatifs au MAP à l'état durci.....	125
3.5.1. Résistance à la compression.....	125
3.5.2. Retrait total et retrait endogène.....	126
3.5.3. Absorption capillaire.....	127
3.6. Récapitulatif du programme expérimental.....	129
CHAPITRE 4: Résultats expérimentaux et discussion.....	132
4.1. Introduction.....	132
4.2. Optimisation du dosage en superplastifiant (Sp/L).....	132
4.2.1. Effet du superplastifiant sur l'étalement au mini-cône.....	132
4.2.2. Effet du superplastifiant sur le temps d'écoulement (V-Funnel).....	133
4.3. Influence des additions minérales sur l'ouvrabilité des MAP.....	135
4.3.1. Influence de la teneur et la finesse du laitier sur l'ouvrabilité des MAP.....	136
4.3.1.1: Essai d'étalement au mini-cône.....	137
4.3.1.2: Essai d'écoulement au V-Funnel.....	139
4.3.2. Influence de la teneur et la finesse de la pouzzolane naturelle sur l'ouvrabilité des MAP.....	140
4.3.2.1: Essai d'étalement au mini-cône.....	141

4.3.2.2: Essai d'écoulement au V-Funnel.....	142
4.4. Influence des additions minérales sur les paramètres rhéologiques des MAP.....	144
4.4.1. Influence de la teneur et la finesse du laitier sur la viscosité et le seuil de cisaillement.....	144
4.4.2. Influence de la teneur et la finesse de la pouzzolane naturelle sur la viscosité plastique et le seuil de cisaillement des MAP.....	147
4.5. Influence des additions minérales sur la résistance en compression des MAP.....	150
4.5.1. Influence du laitier sur le développement de la résistance en compression.....	150
4.5.2. Influence de la pouzzolane naturelle sur le développement de la résistance en compression.....	155
4.6. Influence des additions minérales sur le retrait total et endogène des MAP.....	160
4.6.1. Influence du laitier sur le développement du retrait total et endogène des MAP.....	160
4.6. 2. Influence de la pouzzolane sur le développement du retrait total et endogène des MAP.....	166
4.7. Influence des additions minérales sur les sur l'absorption capillaire des MAP.....	171
4.7. 1. Influence du laitier sur l'évolution de l'absorption capillaire des MAP.....	172
4.7. 2. Influence de la pouzzolane naturelle sur l'évolution de l'absorption capillaire des MAP.....	177
4.8: Conclusion.....	181
Conclusion générale et perspectives.....	184
Références bibliographique.....	186
Annexe A: Exemple de calcul de la composition du mortier	206
Annexe B: Publications internationales.....	209

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Essais de caractérisation des MAP à l'état frais a) : Essais d'étalement au mini cône (b) : Essai d'écoulement au V-Funnel.....	25
Figure 1.2 : Essai d'étalement au cône d'Abrams.....	25
Figure 1.3 : Essai d'écoulement en milieu confiné (a) : Essai à l'U-Box (b) : Essai au L-Box.....	26
Figure 1.4 : Essai de stabilité au tamis.....	27
Figure 1.5 : Blocage des granulats au droit des armatures.....	29
Figure 1.6: a : Etat initial (Avant l'action du superplastifiant) b: Défloculation des grains de ciment.....	31
Figure 1.7: Effet des superplastifiants sur l'étalement et la viscosité des pâtes cimentaires.....	32
Figure 1.8 : Cône et entonnoir pour mesurer l'étalement et le temps d'écoulement des mortiers.....	34
Figure 1.9 : Les comportements rhéologiques des fluides.....	37
Figure 1.10 : Comportements rhéologiques pour différents types de béton.....	39
Figure 1.11 : Schéma de cisaillement.....	40
Figure 1.12 : Début et fin de prise en fonction de la teneur en pouzzolane.....	44
Figure 1.13 : Variation de la teneur en SP en fonction de la teneur en pouzzolane.....	44
Figure 1.14 : Valeurs d'étalement des mortiers à base de pouzzolane.....	45
Figure 1.15 : Effet de la pouzzolane sur l'étalement des BAP.....	46
Figure 1.16 : Effet de la pouzzolane sur le comportement rhéologique des mortiers....	47
Figure 1.17 : Effet de la pouzzolane sur la viscosité plastique des mortiers.....	47
Figure 1.18 : Effet du laitier sur l'étalement des BAP.....	49
Figure 1.19 : Etalement des BAP à base de laitier (GGBFS).....	50
Figure 1.20 : Capacité de remplissage des BAP à base de laitier (GGBFS).....	50
Figure 1.21 : Variation de l'étalement en fonction de la teneur en laitier.....	51
Figure 1.22 : Variation de l'étalement en fonction de la teneur en laitier.....	52
Figure 1.23 : Variation de l'étalement et de la ségrégation des BAP au laitier.....	53
Figure 1.24 : Variation de la viscosité des mortiers au laitier.....	53
Figure 1.25 : Propriétés à l'état frais des BAP au laitier.....	54
Figure 1.26: Variation des paramètres rhéologiques en fonction de la teneur en laitier.....	55
Figure 1.27 : Effet des cendres volantes sur l'étalement des BAP.....	56

Figure 1.28: Variation du temps de prise en fonction de la finesse du laitier.....	58
Figure 1.29 : Etalement des BAP à base de laitier de différentes finesses.....	58
Figure 1.30 : Influence de la finesse des fillers calcaires sur le temps d'écoulement....	59
Figure 2.1: Résistance à la compression en fonction de la teneur de pouzzolane et de laitier.....	64
Figure 2.2: L'effet de la pouzzolane naturelle sur la résistance en compression des mortiers.....	64
Figure 2.3: Résistance en compression des BAP à base de pouzzolane naturelle.....	65
Figure 2.4: Evolution de la résistance en compression des mortiers binaires.....	66
Figure 2.5: Résistance en compression des bétons contenant de la pouzzolane.....	66
Figure 2.6: Influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance en compression des BAP.....	67
Figure 2.7: Evolution de la résistance en compression des BAP.....	67
Figure 2.8: Variation de la résistance en compression des BAP.....	68
Figure 2.9 : Résistance en compression des pâtes de ciment à base de laitier.....	69
Figure 2.10 : Résistance en compression des BAP au laitier.....	70
Figure 2.11 : Résistance en compression des BAP à base des additions minérales.....	70
Figure 2.12 : Influence de la teneur en laitier sur la résistance en compression des BAP à base de granulats recyclés.....	71
Figure 2.13: Influence de la finesse des additions minérales sur la résistance en compression des mortiers.....	73
Figure 2.14 : Résistance en compression des pâtes de ciment en fonction de la finesse du laitier.....	74
Figure 2.15 : Résistance en compression des pâtes de ciment à base de laitier.....	74
Figure 2.16: Evolution de la résistance à la flexion des mortiers binaires.....	76
Figure 2.17: Influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la traction.....	76
Figure 2.18: Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction de la teneur en pouzzolane et du laitier.....	77
Figure 2.19: Résistance à la traction en fonction de la teneur en laitier.....	78
Figure 2.20: Développement de la résistance à la traction des BAP à base de laitier.....	78
Figure 2.21: Relation entre la perte d'eau, l'humidité relative et le retrait de séchage de la pâte de ciment hydraté.....	81
Figure 2.22: Evolution du retrait de séchage des BAP.....	82
Figure 2.23: Influence du laitier sur le retrait de séchage des BAP.....	83
Figure 2.24: Influence du laitier sur le retrait de séchage des BAP.....	84

Figure 2.25: Retrait de dessiccation des BAP au laitier.....	84
Figure 2.26: Influence des additions minérales sur le retrait de dessiccation des BAP.	85
Figure 2.27: Influence des cendres volantes sur le retrait de séchage des BAP.....	86
Figure 2.28: Présentation de la variation volumique.....	88
Figure 2.29: Retrait endogène des BAP et des BO.....	89
Figure 2.30: Evolution du retrait endogène des mortiers à la pouzzolane naturelle.....	89
Figure 2.31: Evolution du retrait endogène des BAP aux additions minérales.....	90
Figure 2.32: Influence des additions minérales sur le retrait endogène des BAP.....	91
Figure 2.33: Retrait endogène des mortiers aux laitiers et aux cendres volantes.....	92
Figure 2.34 : Système de mesure horizontale.....	93
Figure 2.35 : Dilatomètre permettant de mesurer la déformation endogène.....	94
Figure 2.36 : Système de mesure avec des capteurs laser.....	94
Figure 2.37 : Dispositif de mesure avec le système de STAQUET.....	95
Figure 2.38: Fissuration à l'état frais, en termes de retrait et capacité de déformation.....	96
Figure 2.39: Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment.....	97
Figure 2.40: Retrait plastique des formules de BAP et de BO dérivés.....	98
Figure 2.41: Retrait plastique d'un BAP et d'un béton vibré.....	98
Figure 2.42 : Effet de l'addition de cendres volantes sur le retrait plastique.....	99
Figure 2.43: Absorption capillaire des mortiers à base de pouzzolane naturelle.....	103
Figure 2.44: Influence de la pouzzolane naturelle sur le coefficient de sorptivité.....	103
Figure 2.45: coefficients de sorptivité des bétons à 90 jours.....	104
Figure 2.46: coefficients de sorptivité des bétons à 90 jours.....	104
Figure 2.47: Influence du laitier sur le coefficient d'absorption.....	105
Figure 2.48: Effet du laitier sur le coefficient d'absorption.....	106
Figure 2.49: Influence du laitier sur le coefficient d'absorption des BAP.....	107
Figure 2.50: Influence du laitier sur l'absorption capillaire.....	107
Figure 2.51 : Profondeur de pénétration de l'eau des mélanges de BAP.....	109
Figure 2.52 : Profondeur de pénétration de l'eau des BAP au laitier.....	109
Figure 2.53 : Influence du laitier sur la perméabilité à l'eau des BAP.....	110
Figure 2.54 : Perméabilité des ions chlore des bétons à 90 jours.....	112
Figure 2.55 : Influence du laitier sur la perméabilité à l'eau des BAP.....	113
Figure 3.1 : Broyeur à boulets.....	116
Figure 3.2 : Variation de la finesse des ajouts minéraux en fonction du temps de broyage.....	117

Figure 3.3 : Pouzzolane naturelle : (a) avant broyage, (b) après broyage.....	117
Figure 3.4: Laitier de haut fourneau : (a) avant broyage, (b) après broyage.....	118
Figure 3.5: Courbe granulométrique du sable corrigé.....	120
Figure 3.6: Séquence de malaxage du mortier.....	122
Figure 3.7: Essai d'étalement au mini-cône.....	122
Figure 3.8: Essai d'écoulement au V-Funnel.....	123
Figure 3.9: Rhéomètre à mortier Heidolph- RZR 2102.....	124
Figure 3.10: Profil de vitesse.....	125
Figure 3.11 : Dispositif pour l'essai de compression.....	126
Figure 3.12: Essai de retrait (a) retrait total (b) retrait endogène.....	127
Figure 3.13: Dispositif de mesure de l'absorption par capillarité.....	129
Figure 3.14: Organigramme des essais expérimentaux sur MAP à l'état frais.....	130
Figure 3.15: Organigramme résumant le programme expérimental sur MAP à l'état durci.....	131
Figure 4.1: Variation de l'étalement en fonction de la teneur en superplastifiant.....	133
Figure 4.2: Variation du temps d'écoulement en fonction de la teneur en superplastifiant.....	134
Figure 4.3: Variation de l'étalement des MAP à base de laitier avec différentes finesses.....	138
Figure 4.4: Variation du temps d'écoulement des MAP à base de laitier avec différentes finesses.....	140
Figure 4.5: Variation de l'étalement des MAP à base de pouzzolane avec différentes finesses.....	142
Figure 4.6: Variation du temps d'écoulement des MAP à base de pouzzolane avec différentes finesses.....	143
Figure 4.7: Influence de la teneur et la finesse du laitier sur la viscosité plastique des MAP.....	145
Figure 4.8: Influence de la teneur et la finesse du laitier sur le seuil de cisaillement des MAP.....	146
Figure 4.9: Corrélation entre la viscosité et l'étalement des MAP au laitier avec différentes finesses.....	146
Figure 4.10: Influence de la teneur et la finesse de la pouzzolane naturelle sur la viscosité plastique des MAP.....	148
Figure 4.11: Influence de la teneur et la finesse de la pouzzolane naturelle sur le seuil	

de cisaillement des MAP.....	148
Figure 4.12: Corrélation entre la viscosité et l'étalement des MAP à la pouzzolane naturelle avec différentes finesses.....	149
Figure 4.13: Evolution de la résistance en compression des mortiers au laitier (SSB : 350 m ² /kg).....	151
Figure 4.14: Evolution de la résistance en compression des mortiers au laitier (SSB : 420 m ² /kg).....	152
Figure 4.15: Evolution de la résistance en compression des mortiers au laitier (SSB : 500 m ² /kg).....	152
Figure 4.16: Influence de la finesse du laitier sur l'évolution de la résistance en compression des MAP (Taux de substitution: 15%).....	154
Figure 4.17: Influence de la finesse du laitier sur l'évolution de la résistance en compression des MAP (Taux de substitution: 30%).....	154
Figure 4.18: Evolution de la résistance en compression des mortiers à la pouzzolane naturelle (SSB : 350 m ² /kg).....	157
Figure 4.19: Evolution de la résistance en compression des mortiers à la pouzzolane naturelle (SSB : 420 m ² /kg).....	158
Figure 4.20: Evolution de la résistance en compression des mortiers à la pouzzolane naturelle (SSB : 500 m ² /kg).....	158
Figure 4.21 : Influence de la finesse de la pouzzolane naturelle sur l'évolution de la résistance en compression des MAP (Taux de substitution: 15%).....	159
Figure 4.22 : Influence de la finesse de la pouzzolane naturelle sur l'évolution de la résistance en compression des MAP (Taux de substitution: 30%).....	160
Figure 4.23 : Retrait total et endogène des MAP au laitier (SSB: 350 m ² /kg).....	161
Figure 4.24 : Retrait total et endogène des MAP au laitier (SSB: 420 m ² /kg).....	161
Figure 4.25 : Retrait total et endogène des MAP au laitier (SSB: 500 m ² /kg).....	162
Figure 4.26 : Perte de masse des MAP au laitier.....	163
Figure 4.28 : Influence de la finesse du laitier sur le retrait total et endogène des MAP (taux de substitution : 30%).....	165
Figure 4.29 : Retrait total et endogène des MAP à la pouzzolane (SSB: 350 m ² /kg).....	166
Figure 4.30 : Retrait total et endogène des MAP à la pouzzolane (SSB: 420 m ² /kg).....	167
Figure 4.31 : Retrait total et endogène des MAP à la pouzzolane (SSB: 500 m ² /kg).....	167
Figure 4.32 : Perte de masse des MAP à la pouzzolane.....	168
Figure 4.33 : Influence de la finesse du la pouzzolane sur le retrait total et endogène des MAP (taux de substitution : 15%).....	170

Figure 4.34 : Influence de la finesse de la pouzzolane sur le retrait total et endogène des MAP (taux de substitution : 30%).....	171
Figure 4.35 : Effet du taux de substitution du laitier sur l'absorption capillaire des MAP (SSB : 350 m ² /kg).....	172
Figure 4.36 : Effet du taux de substitution du laitier sur l'absorption capillaire des MAP (SSB : 420 m ² /kg).....	173
Figure 4.37 : Effet du taux de substitution du laitier sur l'absorption capillaire des MAP (SSB : 500 m ² /kg).....	173
Figure 4.38 : Effet de la finesse du laitier sur l'absorption capillaire des MAP (Laitier : 15%).....	175
Figure 4.39 : Effet de la finesse du laitier sur l'absorption capillaire des MAP (Laitier : 30%).....	175
Figure 4.40 : Sorptivité des MAP à base de laitier.....	176
Figure 4.41 : Corrélation entre la résistance en compression et la sorptivité des MAP au laitier.....	176
Figure 4.42 : Effet du taux de substitution de la pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire des MAP (SSB : 350 m ² /kg).....	177
Figure 4.43 : Effet du taux de substitution de la pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire des MAP (SSB : 420 m ² /kg).....	178
Figure 4.44 : Effet du taux de substitution de la pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire des MAP (SSB : 500 m ² /kg).....	178
Figure 4.45 : Effet de la finesse de la pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire des MAP (pouzzolane:15%).....	179
Figure 4.46 : Effet de la finesse de la pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire des MAP (pouzzolane:30%).....	180
Figure 4.47 : Sorptivité des MAP à base de pouzzolane naturelle.....	180

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.....	115
Tableau 3.2 : Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé.....	116
Tableau 3.3 : Composition chimique de la pouzzolane naturelle.....	118
Tableau 3.4 : Composition chimique du laitier.....	119
Tableau 3.5 : Caractéristiques du sable utilisé.....	119
Tableau 4.1: Variation de l'étalement en fonction du dosage en superplastifiant.....	133
Tableau 4.2: Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant.....	134
Tableau 4.3: Optimisation des mortiers étudiés.....	135
Tableau 4.4: Composition des mortiers étudiés.....	135
Tableau 4.5: Résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers à base de laitier.....	136
Tableau 4.6: Résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers à base de pouzzolane.....	141
Tableau 4.7: Valeurs de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement en fonction de la teneur et la finesse du laitier.....	144
Tableau 4.8: Valeurs de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement.....	147
Tableau 4.9: Développement de la résistance en compression des MAP à base de laitier.....	150
Tableau 4.10: Développement de la résistance en compression des MAP à base de pouzzolane.....	156

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

Abs	Coefficient d'absorption du sable
AFGC	Association Française de Génie Civil
Al ₂ O ₃	Alumine
BAP	Béton autoplaçant
BO	Béton ordinaire
BV	Béton vibré
C ₃ A	Aluminate tricalcique (célite)
CaO	Oxyde de calcium
C ₃ S	Silicate tricalcique (Alite)
C ₂ S	Silicate bicalcique (bélite)
C ₄ AF	Alumino-ferrite tétracalcique
Ca CO ₃	Carbonate de calcium
Ca(OH) ₂	Portlandite
CEM II/A 42.5	Ciment Portland composé de Classe 42,5
Cl ⁻	Les ions chlorure
CH	Hydroxyde de calcium
CO ₂	Dioxyde de carbone
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
D _{max}	Diamètre maximal des granulats
E	Eau
E/C	Eau/Ciment
E/L	Eau/Liant
E/P	Eau/Poudre
G/S	Gravier/Sable
L	Laitier de haut fourneau
MAP	Mortier autoplaçant
P	Poudre (Ciment+ajout)
PZ	Pouzzolane
R _c	Résistance à la compression
R _f	Résistance à la flexion

SCC	Self-Compacting Concrete
SiO ₂	Silice
S/M	Sable/Mortier
Sp	Superplastifiant
Sp/L	Superplastifiant/Liant
t	Temps d'écoulement a l'entonnoir en V du mortier (sec)
V _p	Volume de pâte (m ³)
ρ _{app}	Masse volumique apparente
ρ _{abs}	Masse volumique absolue
ρ _c	Masse volumique du ciment
Γ _m	Etalement relatif
τ	Contrainte de cisaillement (Pa)
τ _u	Contrainte de cisaillement ultime (Pa)
τ ₀	Seuil de cisaillement (Pa)
μ	Viscosité plastique, (Pa.s-1)
γ	Vitesse de déformation (s-1)

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, le béton est le matériau de construction le plus utilisé par la majorité des entreprises de réalisation. En effet, le béton connaît aujourd'hui un regain d'intérêt dans le domaine de la construction. Économique et facilement manipulable, le béton peut être utilisé dans divers domaines tels que dans le bâtiment. A la fois résistant et durable, il répond à de nombreux critères de performance, ce qui explique son omniprésence actuelle. C'est pourquoi, Les bétons ont connu, ces dernières années, une évolution technologique considérable. Effectivement, à la fin des années 1980, on voit apparaître les bétons à hautes performances et par la suite, de nouvelles grandes innovations ont vu le jour avec notamment les bétons autoplaçants (BAP) et les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP).

L'arrivée du béton autoplaçant a marqué une nouvelle étape dans l'histoire du matériau béton. Ce béton innovant dans le domaine de la construction civile, bâtiment et travaux publics, présente plusieurs intérêts d'ordre techniques et socio-économiques. En effet, ce béton diffère des bétons ordinaires (BO) par son excellente fluidité, une caractéristique ayant longtemps été recherchée dans le domaine de la construction afin d'assurer l'aptitude du béton à être aisément mis en œuvre tout en assurant une bonne stabilité rhéologique. Cependant, la principale difficulté est de pouvoir concilier des propriétés a priori contradictoires : la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton. Pour ce faire, la formulation des BAP présente certaines spécificités dont l'utilisation de superplastifiants, l'augmentation du volume de pâte et la diminution du volume et de la dimension des granulats. Cependant, le volume élevé de liant et la présence d'adjuvant rend le BAP un matériau onéreux. Ajoutons à cela, l'impact environnemental du béton, composé majoritairement de ciment dont la production s'avère très polluante puisqu'elle dégage de grandes quantités de CO₂ conduisant ainsi à définir le béton comme un matériau non écologique. En effet, la production du ciment en Algérie a oscillé entre 25 et 30 millions de tonnes en 2018, alors qu'en 2020, la production atteint les 40 millions de tonnes de ciment. Des impacts négatifs de cette augmentation se répercutent sur le coût et l'environnement. Selon le directeur du développement industriel du groupe GICA, la production d'une seule tonne de ciment consomme une énergie de 115 kwatt/heure. De plus les émissions de CO₂ libérée par les cimenteries, présentent 7% à 8% des émissions

mondiale pour une production moyenne d'une tonne de ciment. Concernant, la consommation des ressources naturelle, Plus de 31 millions de tonnes de calcaire et plus de 14 millions de tonnes d'argile ont été épuisés. Donc la question qui se pose, comment peut-on minimiser l'impact énergétique, environnementale et économique des BAP ? Alors, la solution proposée est de faire introduire des additions minérales dans les compositions de béton ou mortier comme substitue au ciment à savoir la pouzzolane naturelle et le laitier de hauts fourneaux. Ce qui va contribuer à un gain économique certain suite à la réduction énergétique en terme de production de clinker et de plus permet de préserver l'environnement par la réduction des émissions de CO₂. Ajoutons à cela, la préservation des ressources naturelles non renouvelables en diminuant leur consommation. Ce qui permettra alors d'obtenir un béton moins coûteux et plus écologique. Pour cela, la présente étude vise à apporter une contribution à la valorisation de la pouzzolane naturelle et du laitier de hauts fourneaux en tant que substitut partiel au ciment en évaluant expérimentalement leurs effets sur les performances des MAP à l'état frais et à l'état durci à savoir sur l'ouvrabilité, les paramètres rhéologiques et les résistances mécaniques. Par ailleurs, la composition particulière des MAP et BAP décrite par un volume de pâte élevé et la présence d'additions minérales peut avoir une incidence sur le comportement de retrait qui se traduit par une fissuration du matériau qui va se répercuter directement sur la durabilité des bétons. Pour cela, il est nécessaire d'étudier l'influence de ces paramètres sur l'évolution du retrait total et celle du retrait endogène des MAP et BAP.

D'autre part, les ajouts cimentaires lorsqu'ils sont actifs, se caractérisent par des propriétés hydrauliques latentes pouvant influencer négativement les performances des mortiers et bétons particulièrement la résistance en compression à jeune âge. Pour cela, il est nécessaire d'améliorer leur réactivité chimique par l'augmentation de leur surface spécifique qui peut être considérée comme activation mécanique. Ce qui pourra avoir également un impact sur les propriétés rhéologiques et de durabilité des mortiers et bétons autoplaçants.

Le travail expérimental est réalisé sur des mortiers où le ciment est substitué partiellement par le laitier de hauts fourneaux ou la pouzzolane naturelle. Dans ce contexte, cette étude comporte quatre chapitres distincts.

Après une introduction générale, le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les propriétés des bétons et mortiers autoplaçants décrivant les essais de leur caractérisation à l'état frais. Les propriétés rhéologiques et les différentes approches de formulation des MAP proposées dans la littérature sont également présentées. Les résultats de recherches antérieures sur l'influence de la nature, la teneur et la finesse des additions minérales sur le comportement des BAP et MAP à l'état frais sont aussi exposés.

Ensuite, le deuxième chapitre porte sur une synthèse de travaux et de résultats portant sur l'effet des additions minérales sur les performances des matériaux cimentaires à l'état durci.

Cette partie sera suivie d'un troisième chapitre qui présente une description détaillée des matériaux utilisés. Egalement, un aperçu sur les techniques expérimentales en décrivant le mode opératoire de chaque essai effectué est exposé. La méthode de formulation adoptée pour l'élaboration des MAP ainsi que les variables étudiées sont également présentées.

Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse et la discussion des résultats obtenus. Des commentaires avec une comparaison avec d'autres résultats montrent clairement la variation des propriétés d'ouvrabilité et celle des performances des MAP et BAP à l'état durci en présence des additions minérales.

En dernière partie, une conclusion sur le travail réalisé ainsi que des recommandations sont données afin de poursuivre le travail dans cet axe de recherche. La méthode de formulation adoptée pour le calcul de la composition des mortiers est donnée en annexe.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS ET PROPRIÉTÉS DES BÉTONS ET MORTIERS AUTOPLACANTS A L'ÉTAT FRAIS

1.1. Introduction

Cette partie bibliographique présente un aperçu détaillé sur les propriétés liées à l'état frais des bétons et mortiers autoplaçants. En premier lieu, ce chapitre expose une synthèse sur les caractéristiques des BAP et MAP à l'état frais ainsi que leurs propriétés rhéologiques. Les approches de formulation des MAP sont également présentées. Finalement, cette partie met en relief l'influence des additions minérales sur les caractéristiques à l'état frais des bétons et mortiers autoplaçants.

1.2. Définition et Avantages

Lors de la dernière décennie, de nombreuses innovations ont révolutionné les constructions en béton, parmi lesquelles les Bétons Autoplaçants (BAP). Le premier prototype des BAP a été développé au Japon à la fin des années 80 par le professeur Okamura de l'université de Kochi. Leur développement a été nécessaire dans le but d'améliorer la durabilité des ouvrages en béton grâce à des mesures appropriées en améliorant le processus de construction et de mise en place, tels que la capacité de remplissage, la résistance de la ségrégation [1-2].

Les bétons et mortiers autoplaçants se différencient d'un béton ou mortier ordinaire par leur comportement rhéologique à l'état frais qui est le résultat d'une formulation spécifique et leurs propriétés mécaniques à l'état durci. En effet, ces des bétons très fluides qui se mettent en œuvre sous le seul effet de la gravité sans apport de vibration. Ces bétons sont spécialement adéquats pour les constructions de géométrie complexe et difficilement accessible et pour le bétonnage en milieux fortement ferrailés, tout en conservant une bonne homogénéité.

Les propriétés des BAP à l'état frais et leur aptitude de ne pas nécessiter de vibration pour leur mise en place engendrent toute une chaîne d'avantages. En effet, La fluidité, la capacité d'écoulement et l'homogénéité des BAP garantissent un enrobage parfait

des armatures et un remplissage optimal de tous les recoins des coffrages et des moules quelque soit la complexité de leurs formes et la densité d'armatures. La fluidité et la cohésion élevée des BAP et l'absence de ségrégation garantissent la réalisation de parements de qualité, une finition soignée, une teinte homogène, l'absence de bullage et une bonne planéité et régularité de la surface.

Par ailleurs, La mise en œuvre sans vibration conduit à la réduction des nuisances sonores sur les chantiers et donc de la gêne du voisinage. Elle permet aussi la suppression des tâches de vibration et donc une réduction de la pénibilité du travail pour les ouvriers sur les chantiers. Egalement, l'amélioration de la sécurité des ouvriers, en supprimant des postes de travail à risque.

Les caractéristiques des bétons et mortiers autoplacants à l'état frais nécessite l'utilisation d'adjuvants. Ces derniers conduisent à l'augmentation du coût du matériau. Cependant, ils peuvent s'avérer plus économique que ceux des bétons ordinaires par la diminution du coût de la main d'œuvre et des délais de fabrication liés à la suppression de la vibration.

1.3. Caractérisation des BAP et MAP à l'état frais

Les caractéristiques des bétons et mortiers autoplacants à l'état frais peuvent être appréciés par deux paramètres, la fluidité et l'homogénéité du matériau. En effet, ils sont caractérisés par une grande fluidité qui permet d'envisager le bétonnage de zones fortement ferraiillées, difficilement accessibles ou de géométrie complexe. Cependant, les BAP (MAP) ne doivent pas présenter de problèmes de stabilité ou de blocage lors de l'écoulement. Des recommandations de l'AFGC [3] prévoient de caractériser les BAP à l'état frais en prenant en compte les trois caractéristiques principales demandées :

1.3.1. Propriétés des BAP à l'état frais

- **Capacité de remplissage** : pour lui donner une bonne déformabilité et assurer le bon remplissage des coffrages sous l'unique effet gravitaire, sans utiliser un moyen de vibration. Ceci est obtenu par l'augmentation de la fluidité de la pâte (utilisation des superplastifiants hauts réducteurs d'eau, adoption d'un rapport optimal eau/liant) et la réduction des frottements intergranulaires (diminution du volume des gros granulats). Les essais les plus courants, car les plus faciles à mettre en œuvre, permettant de caractériser la

mobilité en milieu confiné sont l'essai d'étalement réalisé à l'aide du cône d'Abrams et l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V. Les divers procédés de caractérisation sont illustrés sur la figure 1.1 pour les MAP et la figure 1.2 pour les BAP [4].

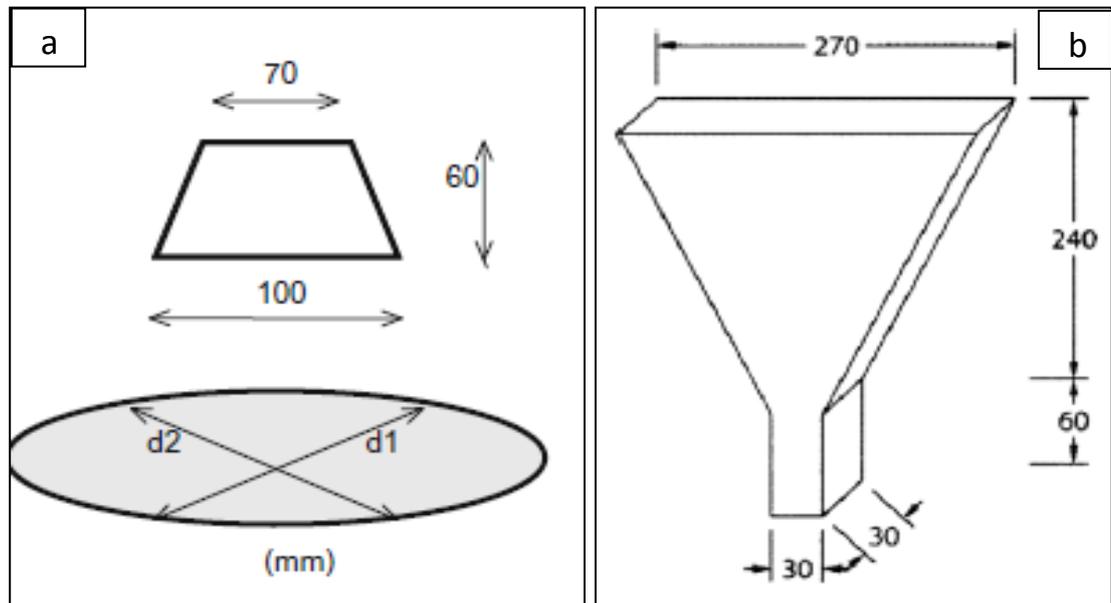


Figure 1.1 : Essais de caractérisation des MAP à l'état frais [4].

(a) : Essais d'étalement au mini cône (b) : Essai d'écoulement au V-Funnel

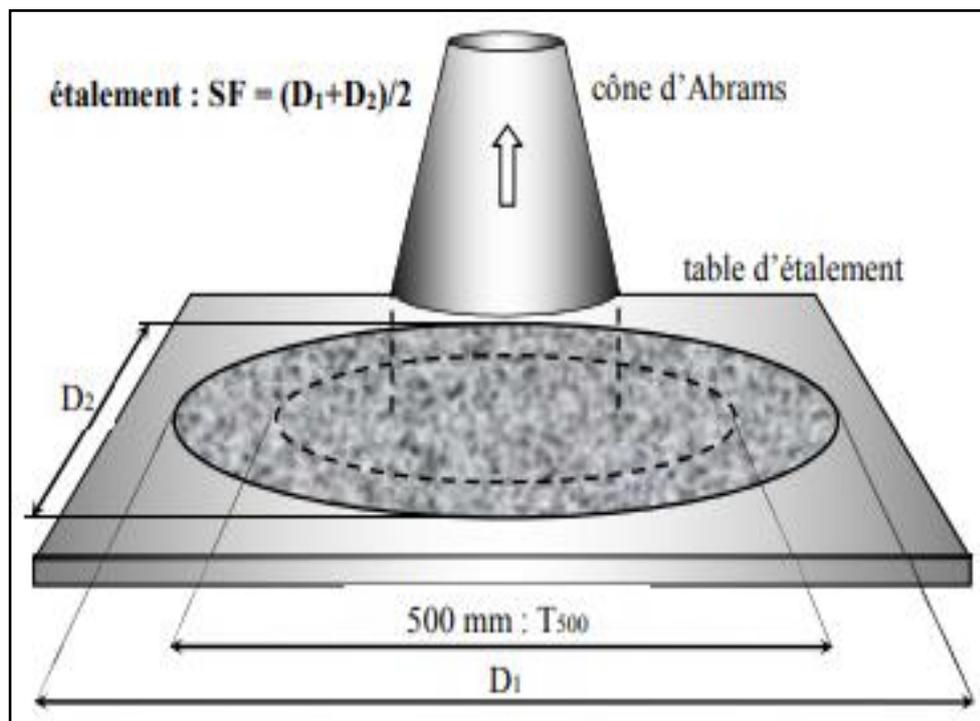


Figure 1.2 : Essai d'étalement au cône d'Abrams [5].

- **Capacité de passage :** pour lui permettre de s'étaler à travers des espaces confinés (densité d'armature considérable) sans perte d'uniformisation et sans blocage de l'écoulement. Ceci peut être obtenu par réduction de la ségrégation (amélioration de la cohésion des granulats en utilisant des agents de viscosité et réduction de rapport E/C) et par limitation du volume des gros granulats et leur diamètre maximal. La mobilité du BAP en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée, sont mesurées avec plusieurs procédés parmi lesquels, l'essai de la boîte en L et l'essai à la boîte en U (Figure 1.3). Ces essais permettent de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures.

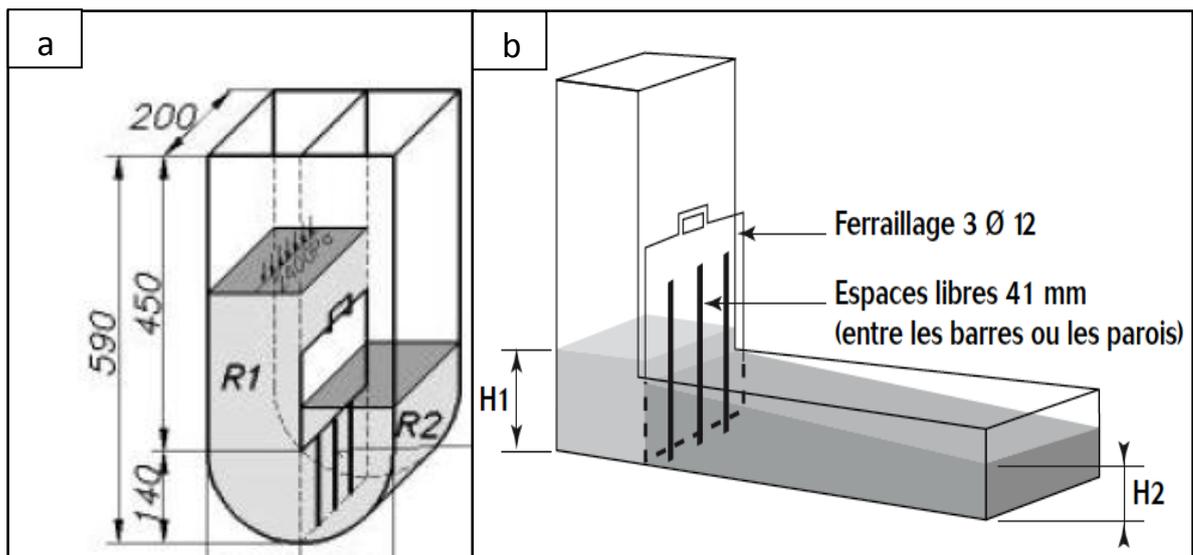


Figure 1.3 : Essai d'écoulement en milieu confiné [4]

(a) : Essai au U-Box (b) : Essai au L-Box

- **Résistance à la ségrégation et au ressuage :** pour lui permettre de rester homogène en résistant à la ségrégation et au ressuage pendant le transport, la mise en œuvre et après placement. La stabilité est améliorée par l'amélioration de la jonction des particules solides (amélioration de la cohésion et de la viscosité, réduction du diamètre maximal des granulats, réduction du volume des gros granulats) et par minimisation du ressuage (réduction du dosage en eau, utilisation des agents de viscosité, utilisation des fines à grande surface spécifique). L'homogénéité du matériau conditionne en effet ses propriétés à l'état durci (résistance mécanique, retrait, durabilité, etc.). Le béton doit donc être stable sous l'effet de la gravité et présenter une capacité de ressuage limitée [3]. La résistance à la

ségrégation d'un BAP doit impérativement être caractérisée. L'essai de stabilité au tamis est généralement utilisé pour caractériser cette capacité d'un BAP à rester homogène après sa mise en place jusqu'au début de prise (Figure 1.4).

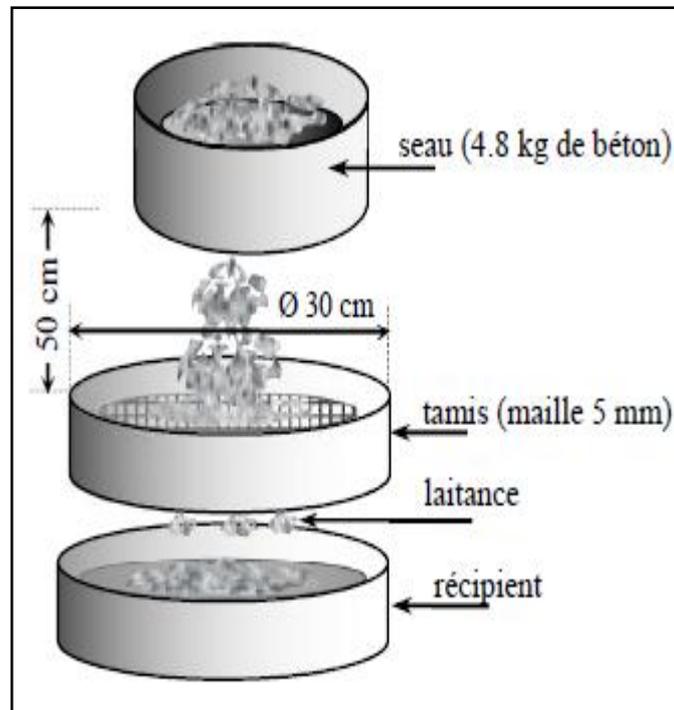


Figure 1.4 : Essai de stabilité au tamis [6].

1.3.2. Facteurs influençant les propriétés des BAP et MAP à l'état frais

Les bétons et mortiers autoplacants sont formulés de manière à obtenir un compromis optimal entre la fluidité et la stabilité. La considération des facteurs internes (la formulation du BAP ou du MAP, la nature et le dosage des matériaux utilisés) est nécessaire pour rendre possible l'obtention de ces propriétés du béton. En outre, les caractéristiques rhéologiques et les performances du BAP ou du MAP sont influencées fortement par les facteurs externes (impacts climatiques, transport, malaxage, etc.).

a. Volume de pâte

Le volume de pâte est souvent considéré comme un paramètre essentiel en ce qui concerne la consistance et les propriétés mécaniques [3]. L'aptitude au remplissage des bétons autoplacants est fortement influencée par les frottements entre les granulats. Pour cela, les

BAP doivent contenir un volume de pâte (ciment + additions+ adjuvants + eau efficace + air) important, de l'ordre de 330 à 400 l/m³.

Des études menées par Khayat et al. [7] rapportent que le volume de pâte doit être important dans les formulations de BAP. La pâte a pour rôle de séparer les graviers en limitant les frottements entre eux, ainsi d'empêcher la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. D'autre part, une étude faite par Girish et al. [8] a relevé que l'augmentation du volume de pâte dans la composition des BAP engendre une augmentation de la fluidité. D'autres études [9] ont reporté que le volume de pâte dans un BAP doit représenter 35 à 45% du volume total, alors que dans un béton traditionnel, il est de l'ordre de 20 à 35% , et qu'un superplastifiant est employé pour fluidifier la pâte.

b. Volume des granulats

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer les quantités optimales en gros granulats capables de donner un maximum de déformabilité et d'ouvrabilité au béton.

Selon Okamura et al. [1-10] le volume des gros granulats dans le béton est un facteur à prendre en considération lors de la formulation d'un BAP. Ils mentionnent que la teneur en gros granulats doit être limitée afin d'augmenter la résistance à la ségrégation du béton frais. Par ailleurs, la quantité de sable contenue dans le mortier ne doit pas être trop importante puisque cela augmente la viscosité du mélange. Cependant, cette dernière doit être relativement faible pour que le BAP ou le MAP s'écoule avec un débit important. En général, ces exigences conduisent à adopter un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1 pour les BAP [3-11].

La fluidité et la stabilité des BAP sont considérablement influencées par la granulométrie des granulats. En effet, Plus un granulat est petit, plus la demande en eau est importante. L'augmentation du diamètre maximal des granulats entraîne des risques de blocage dans un milieu confiné. La limitation de dimensions des granulats est aussi importante que leur volume. En général, ce diamètre est compris entre 10 et 20 mm dans les BAP [3]. Selon Petersson et al. [12], il est conseillé que le diamètre D_{max} des granulats reste dans la limite de 20 mm afin d'éviter tout risque de blocage du béton par les armatures lors du coulage (Figure 1.5).

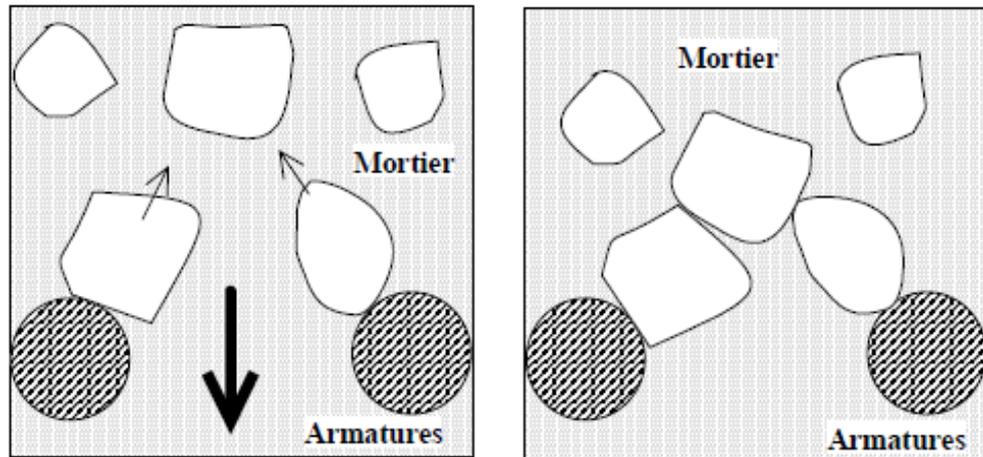


Figure 1.5 : Blocage des granulats au droit des armatures [3].

En ce qui concerne la forme des granulats, l'utilisation de granulats roulés conduit à la diminution de la viscosité des bétons et par conséquent l'obtention d'un mélange plus maniable. Cela a été expliqué par de deux phénomènes : l'effet de roulement à billes les unes sur les autres et la faible surface spécifique d'une sphère [13]. Cependant, pour des mélanges à grains anguleux les réactions d'encombrement sont très élevées, du fait de la grande difficulté que rencontrent ces grains à se mouvoir les uns par rapport aux autres [14].

c. Utilisation des additions minérales

Les bétons et mortiers autoplaçants sont des matériaux très spéciaux dont les caractéristiques résident essentiellement dans leurs grandes fluidités tout en limitant les risques de ségrégation et ressuage.

Les BAP et MAP sont caractérisés par la présence d'une grande quantité de fines comparées à celle d'un béton ou mortier ordinaire. L'étude de l'effet des divers ajouts minéraux sur la formulation et les propriétés des bétons autoplaçants a été l'objectif de nombreuses recherches. Ces additions sont généralement utilisées dans le but de diminuer le coût du béton ou pour améliorer la continuité du squelette granulaire et ainsi réduire les problèmes de ressuage et/ou ségrégation. Parmi les ajouts minéraux les plus utilisés : les fillers calcaires, les cendres volantes, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et la pouzzolane naturelle. Ces particules ultrafines, de granularités inférieures à celle du ciment ont une action à la fois :

- physique par un effet granulométrique où les grains s'insèrent entre ceux du ciment et permettent une diminution du dosage en eau du fait de l'accroissement de la maniabilité ; effet de diminution de la perméabilité et de la capillarité.
- chimique : pour les particules siliceuses présentant une réactivité, liée à leur caractère pouzzolanique, par l'association de la silice et de la chaux libérée par le ciment.

d. Dosage en eau

En plus de son rôle majeur dans le phénomène d'hydratation, l'eau est un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton. L'augmentation du dosage en eau conduit à une augmentation de la fluidité de béton et entraîne la diminution de la concentration en solides. Au niveau rhéologique, cet apport d'eau conduit à une meilleure lubrification. Il en résulte une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité des bétons ou des mortiers (du fait de l'éloignement des particules et la réduction des frictions lors de l'écoulement) [15]. Cependant l'introduction excessive d'eau provoque la chute de résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais [16].

e. Utilisation des adjuvants

Les adjuvants sont des additions qui sont incorporées durant le malaxage pour améliorer les caractéristiques du béton (fluidité, plasticité, propriétés rhéologiques). Les adjuvants les plus utilisés dans les BAP sont les superplastifiants et les agents de viscosité [17].

Les superplastifiants (haut réducteurs d'eau) sont des polymères hydrosolubles dont la synthèse réalisée par une opération complexe de polymérisation produit de longues chaînes de molécules de masses moléculaires élevées. Les superplastifiants permettent de diminuer la quantité d'eau de gâchage tout en ayant une bonne maniabilité du béton à l'état frais lors de sa mise en œuvre. Les superplastifiants agissent par adsorption à l'interface ciment-eau (Figure 1.6). Ils permettent en effet de défloculer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues [18]. La répulsion des grains de ciment

conduit à la libération de l'eau initialement piégée entre les floccs ; ce qui permet de fluidifier le mélange.

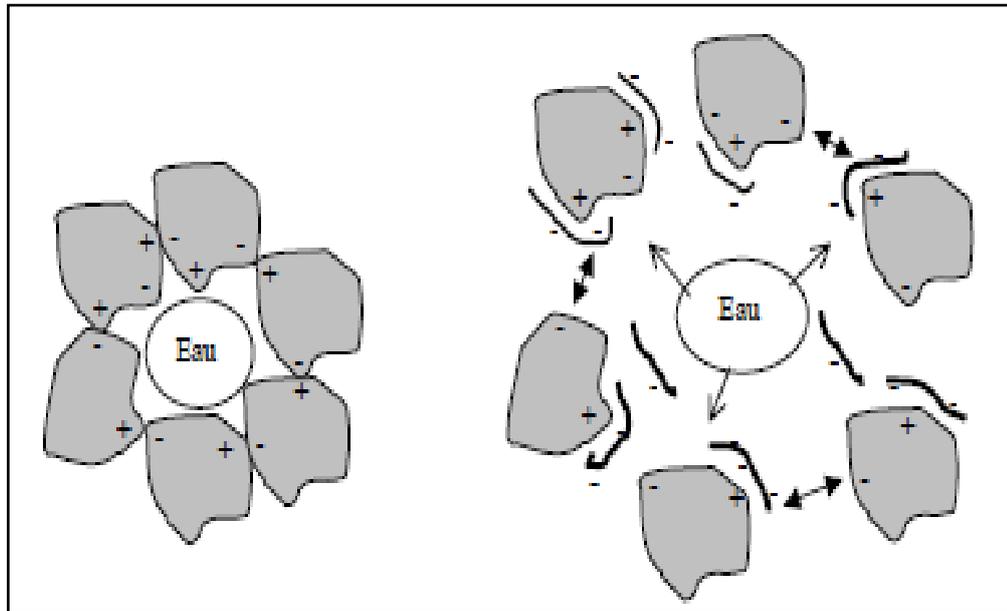


Figure 1.6: A : Etat initial (Avant l'action du superplastifiant)
B : Défloculation des grains de ciment [19].

Cependant, les fortes proportions en superplastifiant (proche ou supérieur au dosage de saturation) peuvent engendrer une baisse de la viscosité de la pâte de ciment et donc du béton (Figure 1.7). Cette diminution de la viscosité expose le béton, lorsqu'il est soumis à un écoulement (notamment lors de son pompage ou de sa mise en place), à des phénomènes d'instabilité et de ségrégation. C'est pour cela que les agents de viscosité sont utilisés. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Ils ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse. Cependant, ils augmentent la demande en eau du mélange et nécessitent leur utilisation en présence de superplastifiants [20].

Menai [21] a étudié l'effet de l'incorporation d'un agent colloïdal (dosage variant de 0 à 0,05% du volume de l'eau) et de superplastifiant (dosage variant de 1,2 à 3% de la masse de liant) sur un mortier. Les résultats ont montré que le ressuage était nul pour les mortiers contenant une teneur en agent colloïdal dépassant les 0,03%. Selon l'AFGC [3], pour les

étons ou mortiers ayant des rapports eau/liant élevés, l'utilisation des agents viscosant s'avère nécessaire car les fines ne seraient pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton.

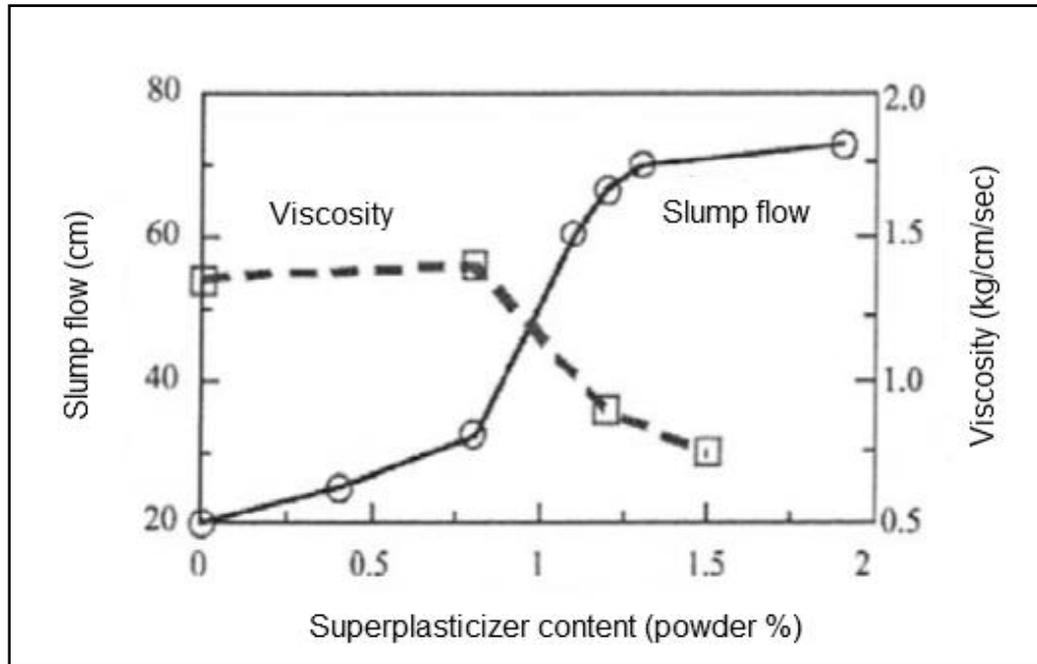


Figure 1.7: Effet des superplastifiants sur l'étalement et la viscosité des pâtes cimentaires [19].

La complexité des propriétés visées et des matériaux employés démontre la nécessité de trouver un compromis lors de la formulation d'un BAP. Différents auteurs se sont intéressés à cette étude et ont proposé des méthodes de formulation de BAP.

1.4. Formulation des BAP

Les BAP doivent présenter une grande fluidité et pouvoir s'écouler sous leur propre poids avec un débit suffisant sans apport de vibration à travers des zones confinées. Ils doivent être stables sous l'effet de la gravité au cours de l'écoulement et dans les phases précédant la prise et le durcissement. Formuler un BAP consiste donc à concilier des propriétés a priori contradictoires : fluidité, stabilité, résistance à la ségrégation. La formulation d'un béton autoplaçant (BAP) est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles et le dosage convenable de chacun de ses constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP. Plusieurs

approches de formulation des BAP se sont développées à travers le monde pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton. La plupart des méthodes de formulation sont conçues actuellement de manière empirique. Elles sont divisées en deux catégories : celles qui sont axées sur l'optimisation du volume de pâte (sous forme de pâte pure ou de mortier) et celles qui sont focalisées sur l'optimisation du squelette granulaire.

1.4.1. Approche Japonaise

La méthode japonaise développée par Okamura et Ozawa est l'une des premières méthodes mises au point pour la formulation des bétons autoplaçants [11]. Cette méthode est basée sur l'approche volumique et considère le béton comme un composé biphasique constitué de graviers et du mortier. Elle préconise l'augmentation du volume de pâte au détriment du volume des granulats, un faible rapport massique eau/liant et l'utilisation de superplastifiant [1].

Le volume des graviers est limité au maximum à 50% au volume solide du béton et ceci dans le but d'éviter tout risque de blocage. Le volume de Sable est fixé forfaitairement à 40 % du volume de mortier, ce qui donne un rapport volumique graviers/sable autour de 1.

La méthode ne précise ni le dosage global en liant ni les dosages séparés en ciment et en addition minérale. Néanmoins, Le dosage en addition minérale peut être choisi sur des critères rhéologiques et de résistances mécaniques. Le rapport Eau/Liant et la quantité de superplastifiant sont optimisés conjointement par deux essais rhéologiques sur mortiers, un essai d'étalement au cône et un essai d'écoulement à l'entonnoir (Figure 1.8). Les essais réalisés ont conduit les chercheurs à définir deux grandeurs :

- L'étalement relatif (fluidité) : $\Gamma_m = (d^2 - d_0^2) / d_0^2$ (1.1)

- La vitesse relative d'écoulement : $R_m = 10/t$. (1.2)

Où :

d (mm) : est le diamètre final de la galette ;

d_0 (mm) : est le diamètre inférieur du cône (100 mm) ;

t (s) : est le temps d'écoulement à l'entonnoir.

Plus la valeur de Γ_m est élevée, plus le mortier est fluide et plus la valeur de R_m est faible, plus la viscosité est élevée. Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément $\Gamma_m=5$ et $R_m=1\pm 0,1$. Le béton obtenu est testé pour vérifier les propriétés d'ouvrabilité, et le dosage du superplastifiant peut être réajusté si nécessaire pour obtenir un béton autoplaçant satisfaisant.

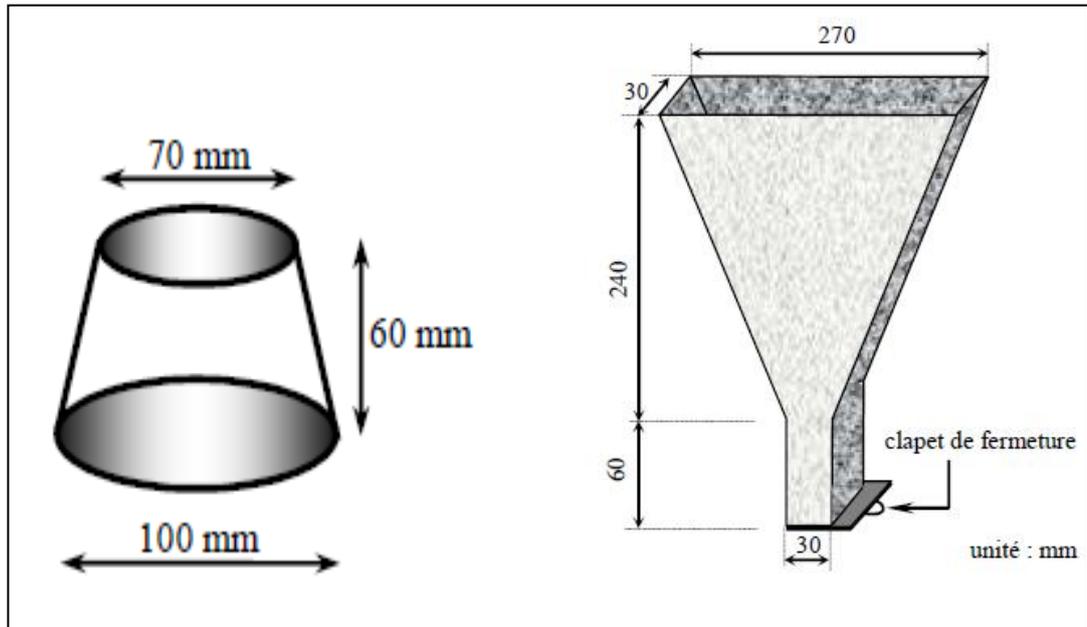


Figure 1.8 : Cône et entonnoir pour mesurer l'étalement et le temps d'écoulement des mortiers [22].

1.4.2. Approche suédoise (CBI)

La méthode de formulation suédoise est développée par CBI. Cette approche est basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferrailés. Elle permet d'optimiser la taille maximale des granulats par rapport à l'espacement entre les armatures, et le volume des granulats dans le béton. Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués par plusieurs études [23-24] sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles. Passant à travers différents espacements d'armature pour chaque taille de granulats, ils ont montré qu'il existe une teneur volumique critique de granulats en deçà de laquelle le risque de blocage est nul et au-dessus de laquelle le blocage est systématique. Cette teneur volumique critique est fonction de l'espacement

entre les armatures (par rapport à la taille des granulats), et de la forme des granulats (roulés ou concassés). La méthode CBI consiste à déterminer le risque de blocage R_b par la relation :

$$R_b = \sum V_i / V_{\text{crit}, i} \quad (1.3)$$

Où :

V_i : la proportion volumique des granulats de taille d_i

$V_{\text{crit}, i}$: la teneur volumique critique de cette fraction granulaire de taille d_i .

Une valeur de R_b proche de 1 indique une forte probabilité de blocage.

1.4.3. Approche du LCPC

Cette approche est développée en France au LCPC par De Larrard [25]. Elle est basée sur le concept du modèle de suspension solide. Ce modèle est un modèle analytique permettant un calcul théorique de la compacité d'un mélange granulaire à partir des caractéristiques des constituants, des proportions du mélange et de la distribution granulaire. Un arrangement idéal du squelette granulaire permet d'obtenir une résistance accrue et une meilleure fluidité. La formulation peut être établie selon les procédures suivantes :

- Une combinaison de liants est à priori fixée pour laquelle le dosage en superplastifiant est choisi. La demande en eau du liant est mesurée en présence du superplastifiant,
- Les calculs sont élaborés en utilisant le modèle de suspension solide en tenant compte du confinement. La viscosité relative est arbitrairement fixée à $5 \cdot 10^4$ Pa.s,
- Le rapport additions minérales/ciment est gardé constant pendant que les proportions des granulats et de liant sont optimisées,
- Le dosage en superplastifiant est ajusté de façon à obtenir l'étalement désiré (60 à 70 cm).

Les auteurs ont modélisé le comportement à l'état frais du béton à partir de la compacité de son squelette granulaire. Cette méthode, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches est simplifiée par la mise en œuvre prenant en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche, elle a permis de déterminer des formulations pour un béton à haute performance, béton ordinaire, béton sec pour démoulage immédiat, béton

autoplaçant). Des extensions de cette méthode de formulation ont été effectuées par les mêmes auteurs afin de prendre en compte plus de paramètres tels que les propriétés des bétons à l'état durci (retrait, fluage, module d'élasticité, résistance à la traction et à la compression).

1.5. Comportement rhéologique des BAP

Les propriétés du béton à l'état durci sont les plus souvent abordées. En effet, les propriétés mécaniques, propriétés de durabilité et propriétés structurales sont des propriétés nécessaires pour qu'un béton soit utilisé en pratique. Cependant, avant de passer à l'état durci, le béton passe par une phase maniable durant laquelle il peut être mis en place. Les propriétés du béton frais sont donc très importantes. En effet, si le béton n'est pas mis en place correctement, les propriétés souhaitées à l'état durci ne seront pas acquises. Afin de répondre à ces problèmes, il est important de pouvoir identifier le comportement en écoulement de ces matériaux, d'où l'importance de bien connaître les propriétés rhéologiques du béton à l'état frais.

La rhéologie est considérée l'un des facteurs les plus importants pour les bétons fluides. La caractérisation du béton ou mortier à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique. La rhéologie donne les relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume. Ces relations, dites de comportement, font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées.

Le comportement rhéologique des fluides peut être décrit par plusieurs modèles. Ils se divisent en deux grandes familles : les fluides newtoniens et les fluides non-newtoniens (Figure 1.9). Le comportement rhéologique de ces corps est illustré à partir de la relation taux de cisaillement- contrainte de cisaillement.

1.5.1. Fluides newtoniens

Le modèle rhéologique le plus simple pour décrire les matériaux visqueux est le modèle newtonien selon lequel la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) est linéairement proportionnelle aux contraintes de cisaillement (τ) appliquées. Le comportement de cette catégorie de fluide est défini uniquement par la viscosité. Cette dernière est définie comme la résistance à

l'écoulement de la matière. Elle est déterminée généralement comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse de cisaillement correspondant.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1.4) \quad [26]$$

Où :

τ : la contrainte de cisaillement [Pa]

μ : la viscosité dynamique du fluide [Pa.s]

$\dot{\gamma}$: le taux de cisaillement [1/s]

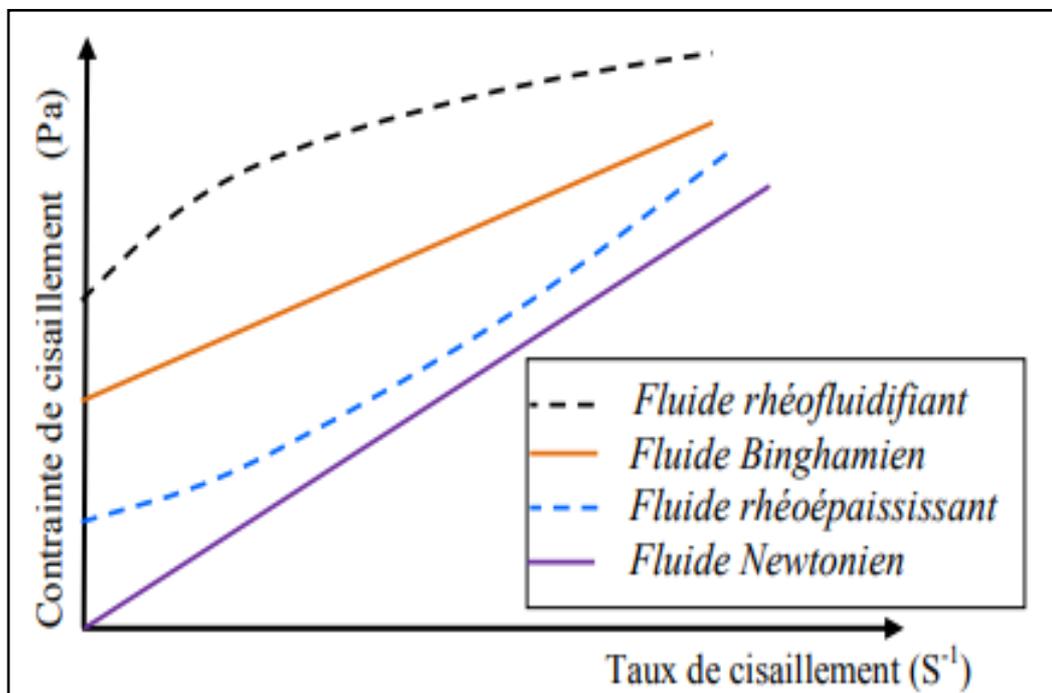


Figure 1.9 : Les comportements rhéologiques des fluides [26].

1.5.2. Fluides non newtoniens

Pour les fluides non newtonien, la contrainte n'est pas proportionnelle au taux de cisaillement. Leur viscosité n'est donc pas constante, donc l'écoulement ne se produit que lorsque la contrainte de cisaillement dépasse une certaine valeur appelée seuil de cisaillement τ_0 , autrement dit, dans le cas où la courbe d'écoulement passe par l'ordonnée à

l'origine τ_0 . On dit que ce fluide présente un comportement viscoplastique. Plusieurs modèles sont utilisés pour décrire les comportements viscoplastiques tels que les fluides Binghamien, les rhéofluidifiants, les fluides rhéoépaississants [27].

- Fluide Binghamien

Pour le modèle Binghamien, une force minimale est exigée pour causer l'écoulement du fluide appelée seuil de cisaillement [28]. Le comportement d'un fluide Binghamien est ensuite analogue à celui d'un fluide visqueux. L'écoulement d'un corps Binghamien est défini par la relation suivante [29] :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1.5) [26]$$

Où :

τ : la contrainte de cisaillement [Pa]

τ_0 : le seuil de cisaillement [Pa]

μ : la viscosité plastique de la pâte [Pa.s]

$\dot{\gamma}$: le taux de cisaillement [1/s]

- Fluide rhéofluidifiant :

Lorsque la viscosité diminue quand le taux de cisaillement augmente, on parle de fluide rhéofluidifiant. Donc le liquide devient moins visqueux et donc plus fluide lorsque le cisaillement augmente [26].

- Fluide rhéoépaississant :

Inversement aux fluides rhéofluidifiant, la viscosité d'un fluide rhéoépaississant augmente avec l'augmentation du taux de cisaillement. Ainsi, le liquide devient plus visqueux et donc plus épais lorsque le cisaillement augmente [26]. Des études [30] ont rapporté que les pâtes de ciment, les mortiers et les bétons sont caractérisés par le comportement d'un fluide Binghamien. D'autres chercheurs [31] ont montré que les bétons présentent un comportement viscoplastique. Ils ont expliqué que les matières cimentaires se comportent comme un solide lorsque la contrainte est inférieure à une valeur critique (seuil de cisaillement). Cependant, si la contrainte appliquée dépasse le seuil de cisaillement, les

bétons s'écoulent comme des liquides visqueux. Plusieurs travaux ont été réalisés sur les propriétés d'écoulement des différents types de béton. En ce qui concerne les bétons autoplaçants, plusieurs modèles existent pour décrire leurs comportements rhéologiques tels que le modèle de Bingham et le modèle de Herschel-Bulkley [32-33-34]. Des études [35] ont montré que le comportement rhéologique des BAP suit le modèle de Herschel-Bulkley où la contrainte de cisaillement τ est reliée au taux de déformation par la relation suivante :

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (1.6) \quad [26]$$

Où :

K : coefficient de consistance,

n : indice de fluidité.

En fonction de l'exposant n, ce modèle peut décrire le comportement visqueux rhéofluidifiant ($n < 1$), le comportement newtonien ($n = 1$) ou le comportement visqueux rhéoépaississant ($n > 1$).

D'autres recherches [10] ont montré que les BAP sont caractérisés par une valeur du seuil d'écoulement bien plus inférieure comparée aux autres bétons. Le comportement de quelque béton fluides est illustré sur la figure 1.10.

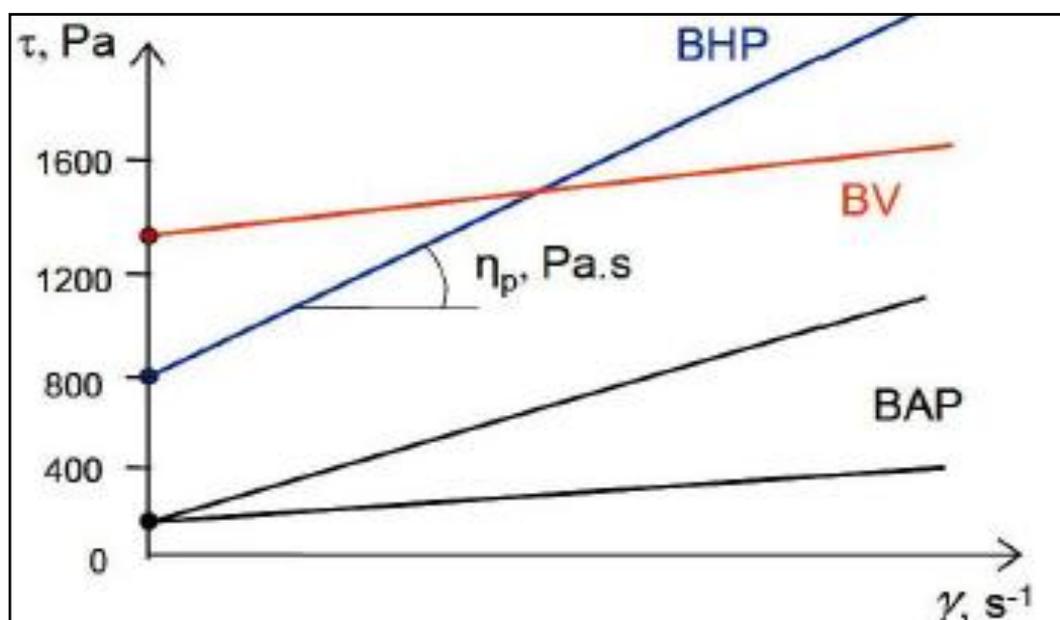


Figure 1.10 : Comportements rhéologiques pour différents types de béton [10].

1.5.3. Paramètres rhéologiques

Pour le béton, la rhéologie désigne généralement l'étude de l'ouvrabilité de ce matériau c'est-à-dire à l'état frais où il est considéré comme un fluide. Les principaux paramètres rhéologiques du béton sont: la contrainte de cisaillement « τ », le seuil de cisaillement « τ_0 », la vitesse de cisaillement « $\dot{\gamma}$ », et la viscosité « μ ». L'obtention de la contrainte de cisaillement et de la vitesse de cisaillement ou taux de déformation permet d'établir des courbes d'écoulement. Ces dernières relient généralement les contraintes de cisaillement aux vitesses de cisaillement et permettent de déterminer la viscosité et le seuil de cisaillement du matériau.

1.5.3.1. Viscosité :

La viscosité est une propriété importante des matériaux qui décrit une résistance des liquides à l'écoulement et qui est liée à la friction interne qui a lieu dans le fluide. Le type de comportement d'écoulement le plus courant est l'écoulement en cisaillement où les couches de fluide se déplacent les unes par rapport aux autres en réponse à une force de cisaillement. Cette force externe prend la forme d'une contrainte de cisaillement définie comme étant la force agissant sur une unité de surface de matériau. Ce phénomène donne lieu à ce qu'on appelle un gradient de vitesse sur l'épaisseur de l'échantillon (Figure 1.11). La viscosité dynamique relative à ce processus correspond au rapport entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse, comme illustré ci-dessous.

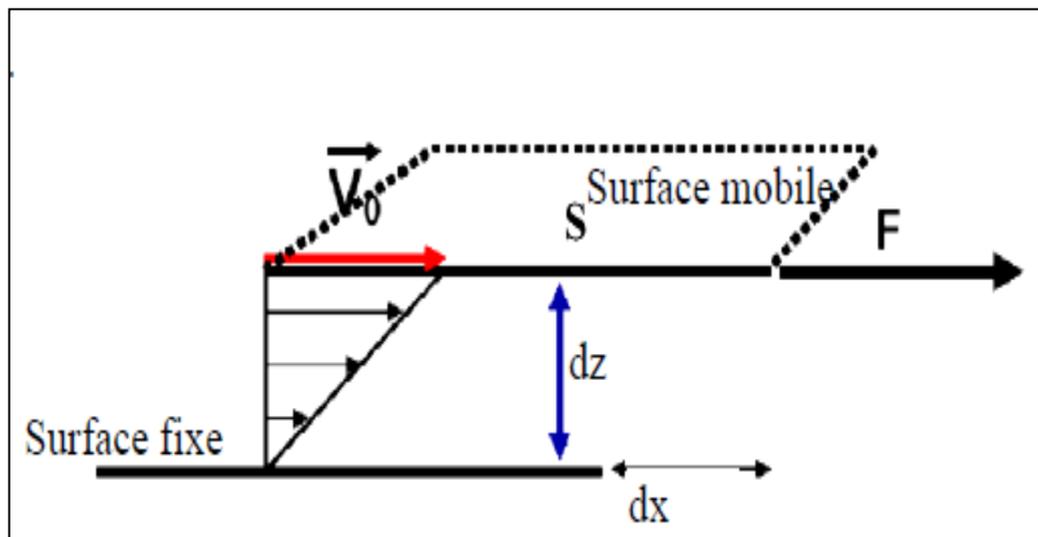


Figure 1.11 : Schéma de cisaillement [26].

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1.7) \quad [26]$$

Où :

μ : viscosité dynamique,

τ : contrainte de cisaillement,

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement.

1.5.3.2. Contrainte de cisaillement:

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. En conséquence, une contrainte de cisaillement τ apparaît s'exerçant de manière parallèle ou tangentielle à la face du matériau. Ainsi, la contrainte de cisaillement est définie par le rapport d'une force à une surface.

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (1.8) \quad [26]$$

Où :

τ : contrainte de cisaillement [Pa],

dF : projection de la force de frottement tangentielle,

dS : surface élémentaire d'une couche cisailée.

1.5.3.3. Vitesse de cisaillement:

Lorsque le fluide s'écoule en régime laminaire, la répartition des vitesses suit une loi linéaire entre deux plans parallèles, dont l'un se déplace à une vitesse constante et l'autre est stationnaire. Il se crée un gradient de vitesse entre les deux plans. La vitesse de cisaillement appelée aussi gradient de vitesse ou taux de cisaillement est définie par la vitesse de déformation entre deux couches successives voisines du fluide cisailé. Elle est souvent présentée comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement [36].

$$\dot{\gamma} = \frac{dY}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dz} \right) = \frac{d}{dz} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dz} \quad (1.9) \quad [26]$$

1.5.3.4. Seuil de cisaillement:

Le seuil de cisaillement (τ_0) est la contrainte de cisaillement minimale nécessaire pour initier l'écoulement d'un matériau ou le stopper. En dessous du seuil de cisaillement, le matériau se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes). Par contre, dès que la contrainte de cisaillement dépasse le seuil d'écoulement, le matériau se comporte comme un fluide visqueux et s'écoule macroscopiquement d'une façon irréversible.

1.6. Influence des additions minérales sur les propriétés des BAP et MAP à l'état frais

Une addition minérale est une poudre d'une surface spécifique supérieure à celle du ciment. Elle peut être substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajoutée directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Elle permet ainsi d'améliorer certaines propriétés ou conférer aux matériaux des propriétés particulières. Plusieurs types d'ajouts sont bien connus tels que les pouzzolanes naturelles, les laitiers des hauts fourneaux, la fumée de silice ainsi que les cendres volantes.

Les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires sont significativement influencées par les additions minérales. En effet, leur utilisation est bénéfique sur le plan rhéologique. Elles contribuent par leur activité physique, hydraulique et pouzzolaniques à améliorer le comportement des ciments à l'état frais. Leur incorporation dans le béton permet d'améliorer la granulométrie totale du mélange par la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granulométries différentes. Ceci favorise l'augmentation de la stabilité et l'accroissement de la déformabilité du béton [20].

D'autre part, il est connu que les ajouts minéraux sont moins réactifs à court terme comparés au ciment ce qui va engendrer la diminution du dégagement de chaleur dû aux réactions exothermiques et l'augmentation du temps d'ouvrabilité des bétons. Dans ce qui suit est rapporté l'effet des additions minérales utilisées dans cette étude à savoir le laitier et la pouzzolane naturelle sur les propriétés des bétons et mortiers autoplaçants à l'état frais.

1.6.1. Influence de la nature et la teneur des ajouts minéraux

Les pouzzolanes doivent leur nom aux cendres volcaniques de la région de Pouzzoles, en Italie, dont l'utilisation et les propriétés liantes étaient connues à partir de l'époque romaine [37]. Les pouzzolanes naturelles sont des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires essentiellement composées de silice, d'alumine et d'oxyde de fer et ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques : elles sont capables de réagir en présence d'eau, avec de l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des nouveaux composés stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [37]. Sa couleur varie généralement du noir au rouge selon le degré d'oxydation du fer. Le ciment à la pouzzolane naturelle fut employé en Italie en 1910, seulement sa fabrication n'a pas été développée à cause de la baisse considérable de ses résistances mécaniques. Après des progrès conséquents dans la maîtrise de son activité, le ciment à la pouzzolane est utilisé aujourd'hui dans l'industrie cimentaire par plusieurs pays tels que la Chine, l'Allemagne, la Grèce, la Turquie, le Mexique et l'Algérie [26].

L'introduction de la pouzzolane dans la confection du béton peut affecter considérablement ses propriétés à l'état frais. En effet, Chaib et al. [38] ont montré, en étudiant les propriétés des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle, que dans les mélanges ciment-pouzzolane, le temps de début et de fin de prise diminuent en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par l'addition (Figure 1.12).

Belaribi [39] a également étudié l'effet de la pouzzolane sur les propriétés des bétons. L'auteur a confirmé que l'augmentation du taux de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle entraîne une diminution de la maniabilité des mortiers. Par conséquent, il a été conclu que pour garder une maniabilité constante il faut augmenter le dosage en superplastifiant avec l'accroissement du taux de substitution de l'addition (Figure 1.13). Ces résultats ont été expliqués par le fait que l'augmentation progressive de la surface spécifique des liants pouzzolaniques conduit à une croissance de la demande en eau. L'effet de la pouzzolane naturelle de Béni-saf sur les propriétés des pâtes de ciments à l'état frais a été étudié par Aichoube et al. [40]. Il a été montré que la substitution du ciment par la pouzzolane de 10% à 30% engendre une augmentation de la consistance normale (diminution de l'ouvrabilité) et une diminution du temps de prise de la pâte de ciment. Ces résultats sont conformes avec ceux trouvés par Ezziane et al. [41].

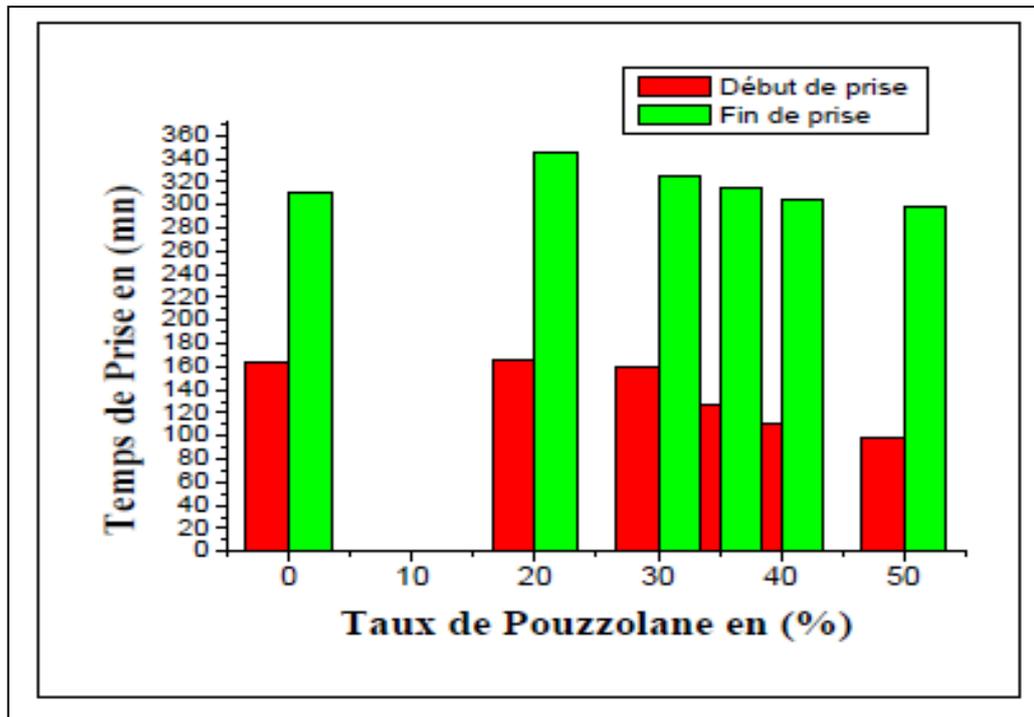


Figure 1.12 : Début et fin de prise en fonction de la teneur en pouzzolane [38].

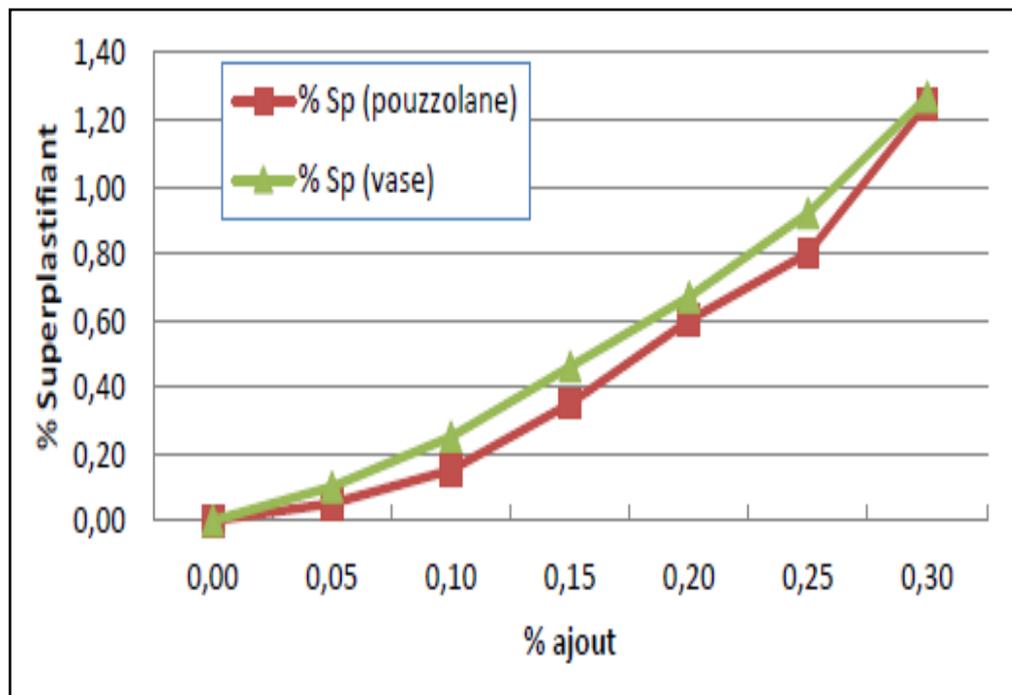


Figure 1.13 : Variation de la teneur en SP en fonction de la teneur en pouzzolane [39].

En effet, il a été montré que l'addition de la pouzzolane naturelle en grandes quantités engendre une accélération de la prise de la pâte de ciment générée par une importante

consommation d'eau par l'hydratation. Colak [42] a également montré qu'à maniabilité constante, le besoin en eau des pâtes de ciment Portland augmente lorsque le ciment est substitué par la pouzzolane naturelle. Des travaux menés par Belaidi et al. [43] sur l'effet de la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre sur les propriétés des mortiers autoplaçants ont montré que lorsque le taux de substitution du ciment par la pouzzolane est inférieur à 15%, les valeurs d'étalement des compositions binaires sont comparables à celles du mortier témoin. Cependant, les auteurs ont remarqué que l'introduction de 20% et 25% de pouzzolane conduit à une diminution de l'étalement des mortiers. Cette diminution est beaucoup plus remarquée pour un taux de substitution de 25% (Figure 1.14). Similaires observation ont été révélées par Omrane et al. [44] où les auteurs ont confirmé que pour une teneur de substitution en pouzzolane inférieure à 15%, les valeurs d'étalement sont comparables à celle du béton de référence. Cependant, ils ont noté une diminution du diamètre d'étalement de 729 mm à 625 mm pour les BAP contenant 0% et 20% de pouzzolane naturelle respectivement (Figure 1.15). D'autres résultats de recherches [45] ont confirmé que l'utilisation croissante de la pouzzolane naturelle entraîne une diminution des diamètres d'étalement. Ce phénomène a été expliqué par la forte demande en eau et en superplastifiant de la pouzzolane utilisée.

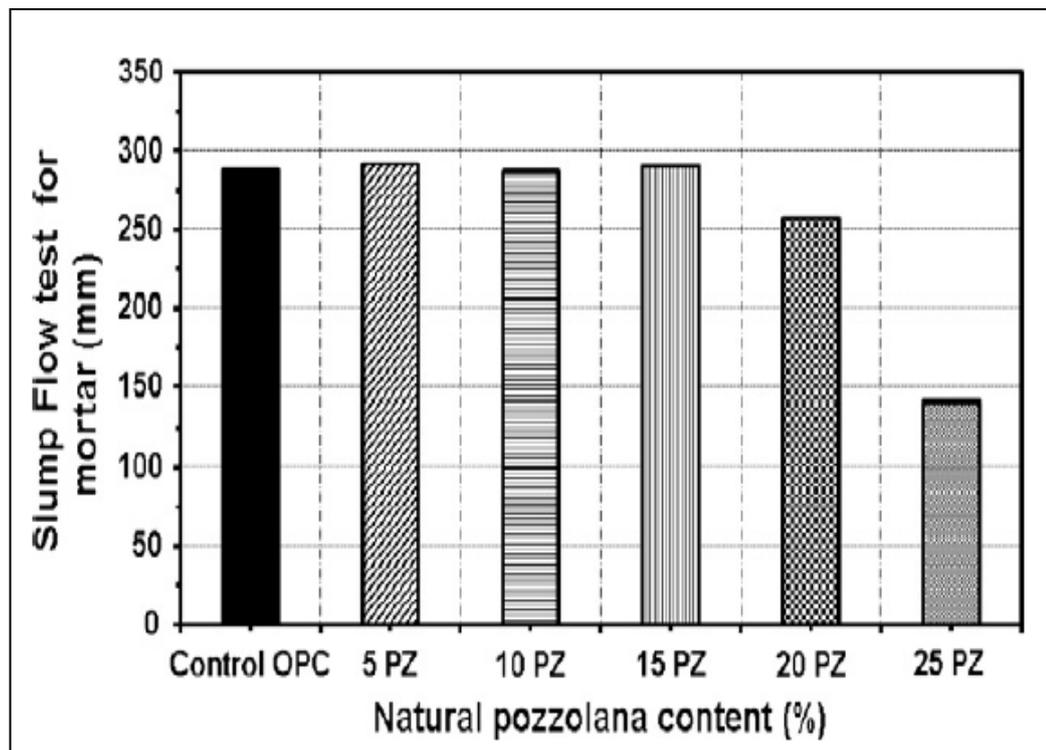


Figure 1.14 : Valeurs d'étalement des mortiers à base de pouzzolane [43].

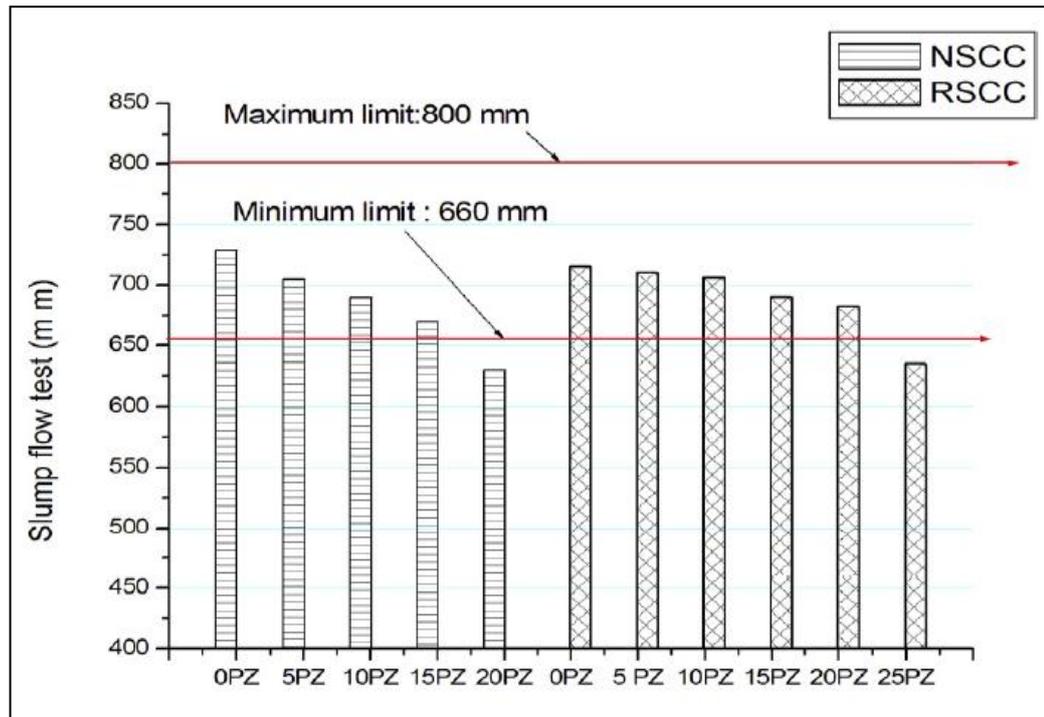


Figure 1.15 : Effet de la pouzzolane sur l'étalement des BAP [44].

Selon les auteurs, les résultats obtenus peuvent être également liés à la finesse élevée de la pouzzolane comparée à celle du ciment, et aussi par la présence des aluminates et des alcalis dans la pouzzolane naturelle. Ce composant chimique a une influence sur la consommation du superplastifiant qui a pénalisé l'étalement [45]. Dada et al. [46] ont étudié les propriétés à l'état frais des mortiers confectionnés à base de pouzzolane. Les auteurs ont observé que l'ouvrabilité augmente avec l'accroissement de la teneur de l'addition de 0% à 10%. Par ailleurs, ils ont remarqué que l'incorporation de 5% et 10% de pouzzolane naturelle conduit à une diminution significative de la viscosité et du seuil de cisaillement du mortier comparé à ceux du mortier témoin. Par conséquent une augmentation de l'affaissement et une diminution du temps d'écoulement (Figure 1.16). Cette baisse de viscosité a été justifiée par l'augmentation du volume de pâte générée par l'incorporation de la pouzzolane naturelle (ayant une faible densité par rapport à celle du ciment). Cependant, une augmentation des paramètres rhéologiques a été constatée avec l'utilisation de 15% de pouzzolane. D'après Adjoudj et al. [47], l'effet de la pouzzolane naturelle n'est pas perceptible. En effet, Les auteurs ont étudié le comportement rhéologique des mortiers et ont constaté que la viscosité des mortiers augmente avec l'accroissement de la teneur en pouzzolane naturelle. Également, ils ont prouvé que le seuil du cisaillement du mortier est considérablement augmenté avec l'accroissement du

taux de substitution par cette addition même avec la présence d'un superplastifiant (Figure 1.17). Des résultats similaires ont confirmé que la substitution du ciment par des taux élevés de pouzzolane conduit à une augmentation de la viscosité [48].

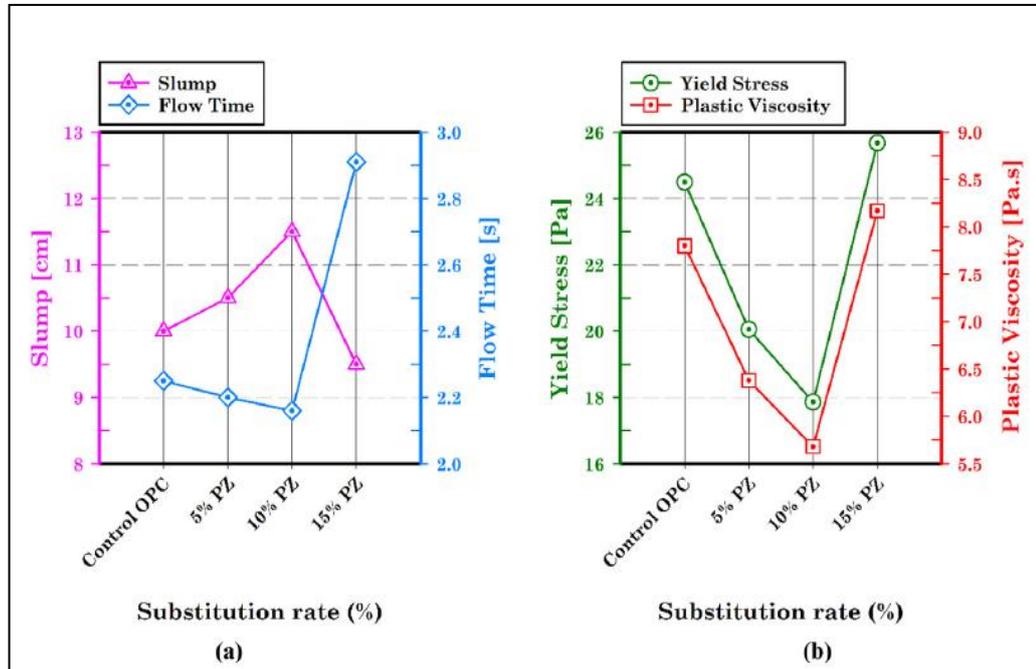


Figure 1.16 : Effet de la pouzzolane sur le comportement rhéologique des mortiers [46].

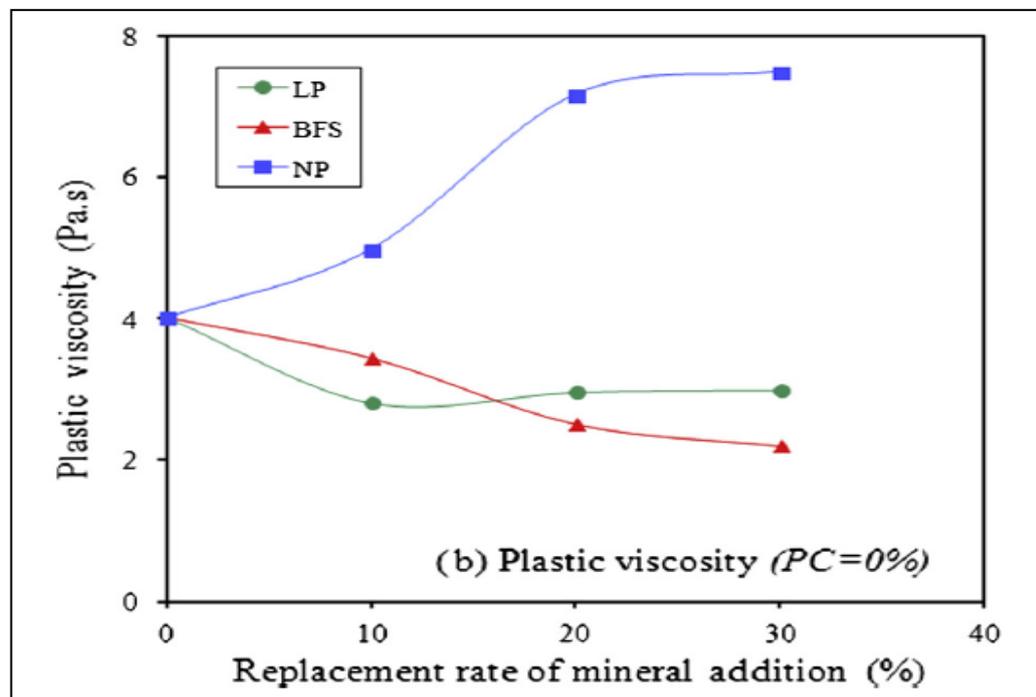


Figure 1.17 : Effet de la pouzzolane sur la viscosité plastique des mortiers [47].

Les laitiers de haut fourneau sont des sous-produits issus de la fabrication de la fonte. Ils sont obtenus par refroidissement brutal au contact avec de l'eau de manière à le fracturer et à le vitrifier. Ils présentent des propriétés hydrauliques latentes sous l'effet d'un activant (clinker ou chaux). Le laitier de haut fourneau, de composition chimique très stable, est souvent valorisé dans la fabrication de ciment. Les laitiers se présentent sous forme de granules. Ils comportent de la chaux CaO, de l'ordre de 40 à 50%, la silice SiO₂, de 25 à 35 % environ, l'alumine Al₂O₃ de l'ordre de 12 à 30% et la magnésie MgO, 8 % environ. Ces mêmes oxydes constituent principalement le ciment Portland mais dans des proportions différentes [49]. La norme française NF P 15-301 [50], exige pour la fabrication des ciments composés que :

- Le laitier granulé soit constitué d'au moins deux tiers, en masse, de la somme des oxydes CaO, MgO et SiO₂.
- Le rapport en masse (CaO+MgO)/ SiO₂ dépasse 1.

L'indice d'activité est un paramètre important. Ce rapport permet d'assurer une alcalinité élevée permettant au laitier d'avoir une bonne hydraulité [51]. En effet, l'activité hydraulique du laitier est liée à son alcalinité. Cette dernière est définie par le rapport de la somme des oxydes basiques à la somme des oxydes acides [52]. Selon l'indice de basicité, le laitier se divise en deux catégories :

Basique dans le cas où l'indice est supérieur à 1 ($\text{CaO/SiO}_2 > 1$) ou Acide si l'indice est inférieur à 1 ($\text{CaO/SiO}_2 < 1$). Selon la littérature [53], le rapport doit varier entre 1,3 et 1,4 dans le but d'assurer de bonnes performances du laitier. Si l'indice est inférieur à 1,1, le laitier est considéré comme acide et par conséquent une faible activité hydraulique.

Le BAP ou MAP à base de laitier de haut fourneau peut être obtenue de deux manières différentes: en ajoutant le laitier de haut fourneau séparément dans le mélange, ou en utilisant un ciment de laitier de haut fourneau. La réaction de laitier est principalement activée par la chaux mis à disposition lors de l'hydratation du clinker. Il est bien connu que les laitiers réagissent plus lentement avec de l'eau, et que la réaction de laitier est plus sensible à la chaleur comparé à celle du clinker [54]. L'utilisation du laitier en cimenterie s'est étendue à travers le monde à cause de ses performances mécaniques, de son économie et de sa valeur écologique.

La substitution du ciment par du laitier algérien à été jugée très bénéfique sur le comportement des BAP à l'état frais [55]. Pour un rapport E/C et un dosage en superplastifiants constants, une amélioration de la maniabilité a été observée (Figure 1.18). Cette amélioration est attribuée à la qualité de surface des grains de laitier qui crée des zones de glissement dans la pâte [56]. Par ailleurs, les auteurs ont remarqué que la demande en eau diminue avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange [55]. Des résultats similaires ont été obtenus par Kouider Djelloul et al. [57].

Alaa [58] a étudié l'effet de l'incorporation du laitier (Taux de substitution $\geq 45\%$) sur les propriétés des pâtes de ciment, mortiers et bétons. Les résultats de leurs travaux ont également montré que la substitution du ciment par le laitier engendre une diminution de la chaleur d'hydratation et une augmentation de l'ouvrabilité. L'étude réalisée par Olatokunbo et al. [59] a démontré qu'un taux de remplacement de 10% de laitier améliore l'étalement des BAP. Au-delà de cette valeur (20% et 30%), ils ont noté une diminution de l'étalement (Figure 1.19). Sambangi et al. [60] ont étudié la capacité de passage et de remplissage des BAP contenant de 0% à 70% de laitier. Ils ont constaté que l'incorporation du laitier améliore les propriétés des BAP à l'état frais (Figure 1.20). Ce phénomène a été expliqué par les caractéristiques des surfaces des grains de laitier qui permettent un meilleur glissement inter granulaire dans la pâte [21].

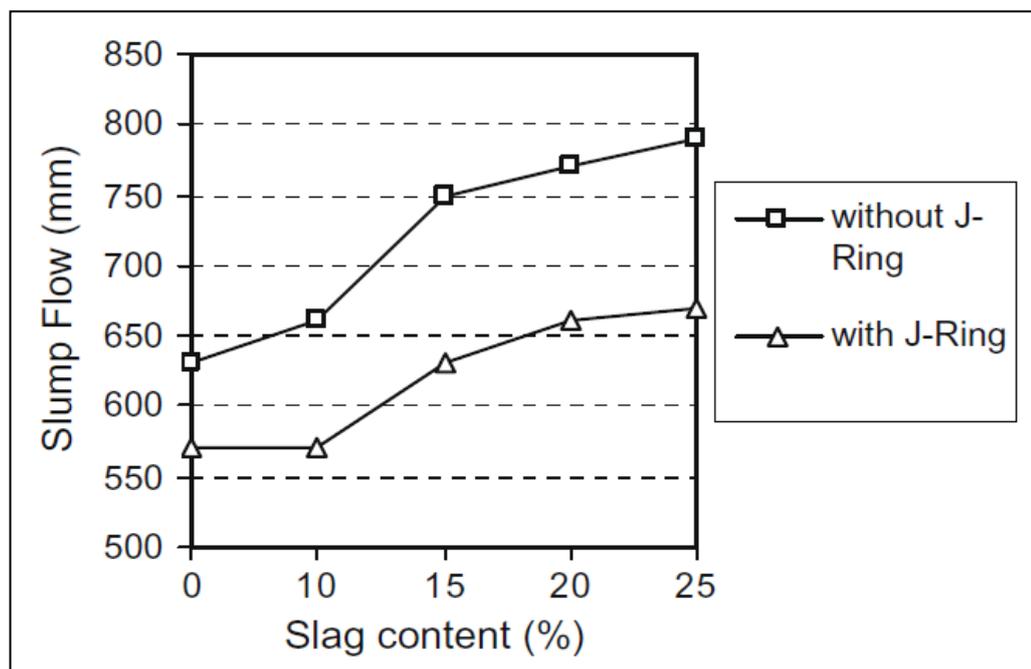


Figure 1.18 : Effet du laitier sur l'étalement des BAP [55].

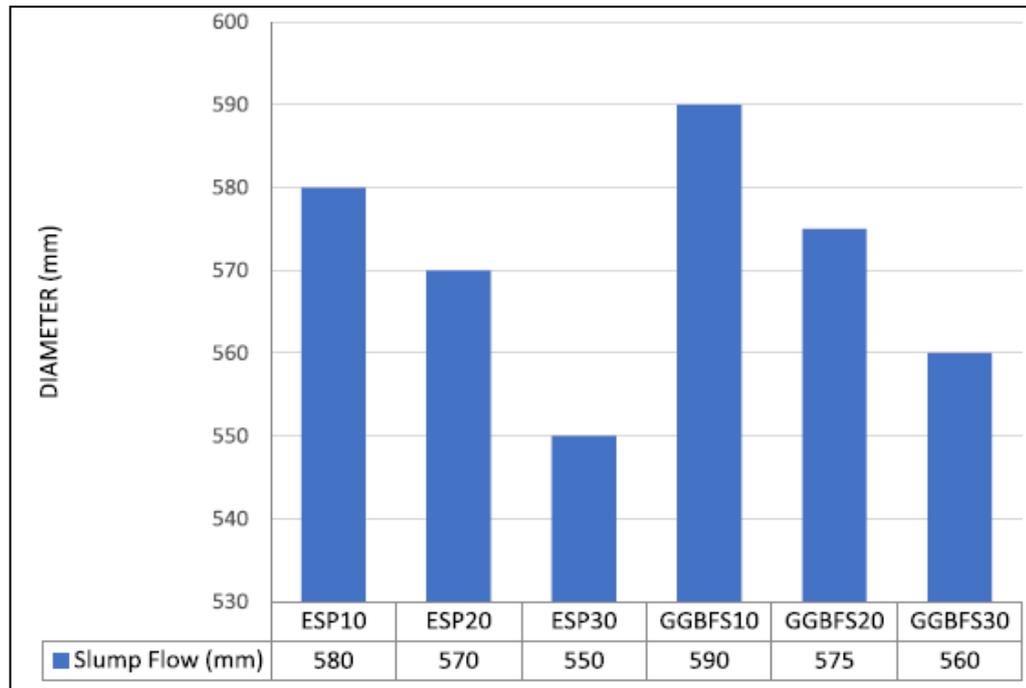


Figure 1.19 : Etalement des BAP à base de laitier (GGBFS) [59].

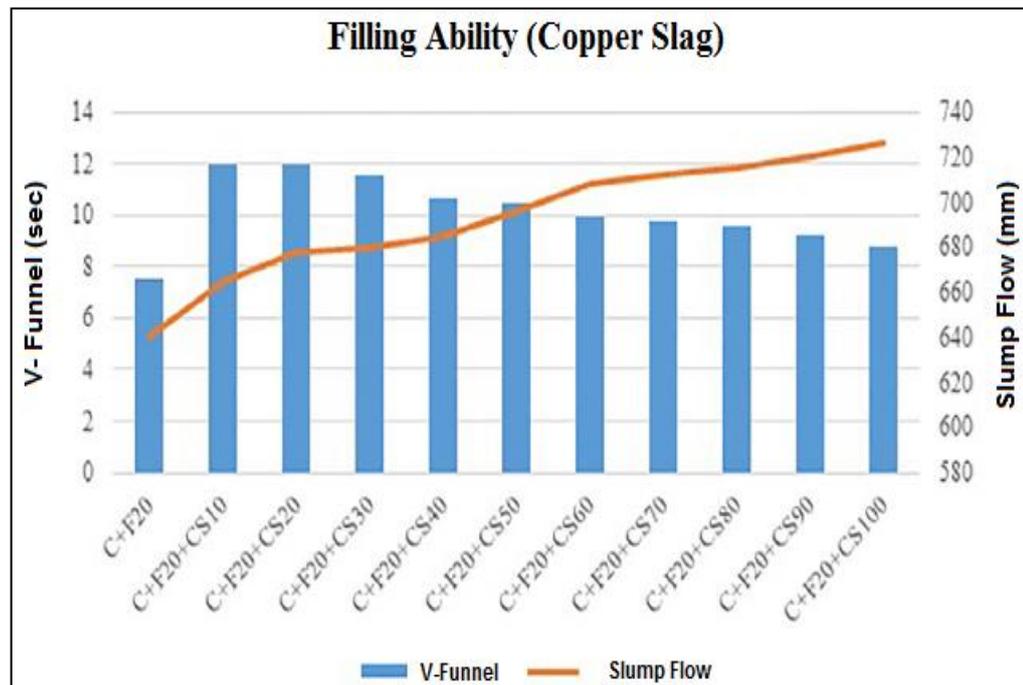


Figure 1.20 : Capacité de remplissage des BAP à base de laitier (GGBFS) [60].

L'étude de Vivek [61] consiste à quantifier l'effet de la substitution du ciment par du laitier (de 30 à 50%) et du métakaolin (de 5 à 15%) sur les performances des BAP. L'auteur a observé que les mélanges ayant un taux de substitution de 40% (30% laitier et 10%

métakaolin) présentent un meilleur diamètre d'étalement. Au-delà de 40%, des valeurs inférieures d'étalement ont été obtenues. Les travaux de Kali et al. [62] illustrés sur la figure 1.21 montrent que l'incorporation d'un volume important de laitier de l'ordre de 30 à 90% a un effet bénéfique sur le comportement des BAP à l'état frais. En effet les auteurs ont remarqué que les valeurs d'étalement augmentent avec l'accroissement de la teneur de l'addition. Par ailleurs, Almuwbbber et al. [63] ont étudié l'effet de l'incorporation des cendres volantes et du laitier sur les performances des BAP. Le laitier a été introduit à des teneurs de 30%, 40%, 50%, 60% et 70%. Les chercheurs observent que la substitution du ciment par le laitier conduit à une augmentation significative de l'étalement des BAP à une valeur de l'ordre de 850 mm. L'amélioration de la fluidité des bétons et mortiers apportée par la présence du laitier conforte celle obtenue par plusieurs auteurs [64, 65, 66, 67]. Sur une étude de l'effet du laitier (0%, 25%, 50% et 65%) sur les propriétés des bétons à très haute performances, Liu et al. [68] ont conclu que la substitution du ciment par le laitier engendre une augmentation de la fluidité. Un remplacement partiel de 25% de laitier permet de réduire la demande en superplastifiant d'environ la moitié. Ces résultats ont été expliqués par la faible absorption d'eau des grains de laitier et à la morphologie de ce dernier conduisant à un meilleur mouvement des particules au moment du malaxage.

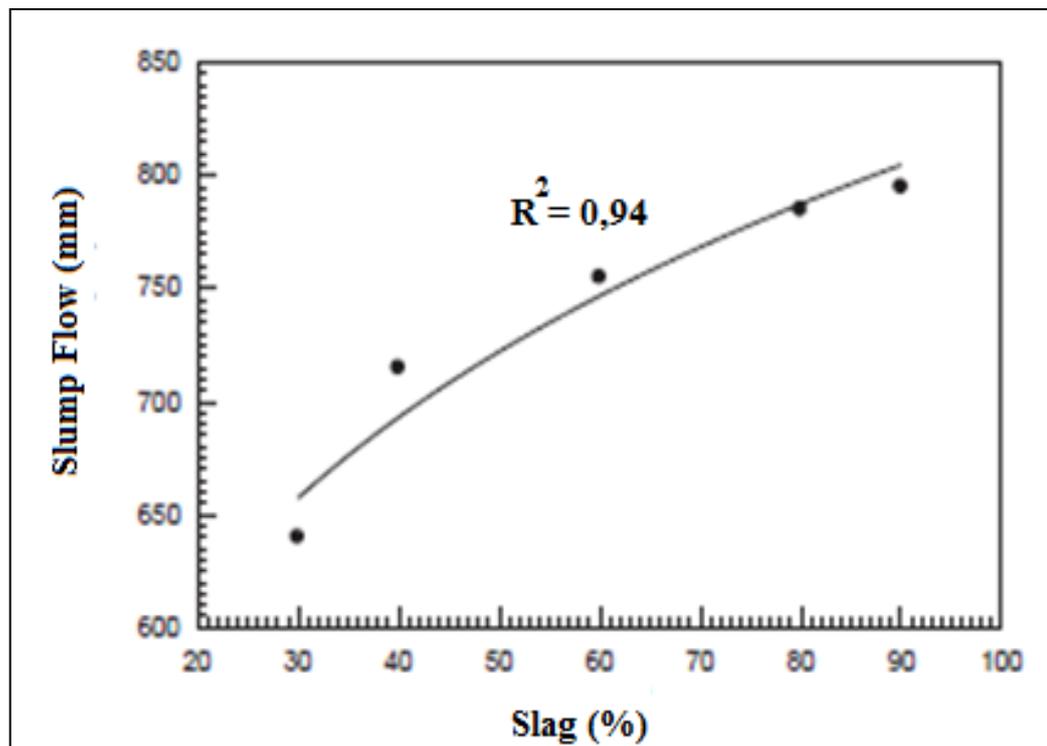


Figure 1.21 : Variation de l'étalement en fonction de la teneur en laitier [62].

Cependant, Langaroudi et Mohammadi [69] arrivent à conclure que les BAP au laitier présentent des valeurs d'étalement comparables à celles du béton témoin (Figure 1.22) contrairement aux cendres volantes qui réduisent la demande en superplastifiant. Ce phénomène a été attribué à la géométrie sphérique des particules de cendres volantes entraînant ainsi une meilleure ouvrabilité. Pan et al. [70] ont montré, avec les résultats présentés sur la figure 1.23, que l'amélioration de la maniabilité des BAP varie selon la quantité du laitier incorporée. En effet l'accroissement de la teneur en laitier entraîne une augmentation des valeurs d'étalement. Cependant, les auteurs ont remarqué que l'ajout du laitier contribue à diminuer la résistance à la ségrégation des BAP.

En plus de la fluidité, la viscosité du béton constitue un second critère important pour caractériser le comportement du béton ou mortier autoplaçants. La viscosité est d'autant plus faible que les forces de frottement internes sont petites. Le béton s'écoule et s'étale d'autant plus rapidement que la viscosité est faible. Une étude [26] qui consiste à quantifier l'influence de la teneur en laitier (10, 20 et 30%) sur les propriétés rhéologiques des mortiers montre que la viscosité diminue en présence de laitier. Une baisse de viscosité de 45%, 42% et 38 % a été enregistrée en substituant le ciment par 10%, 20% et 30% de laitier respectivement en utilisant un superplastifiant à base de polycarboxylates PC (Figure 1.24).

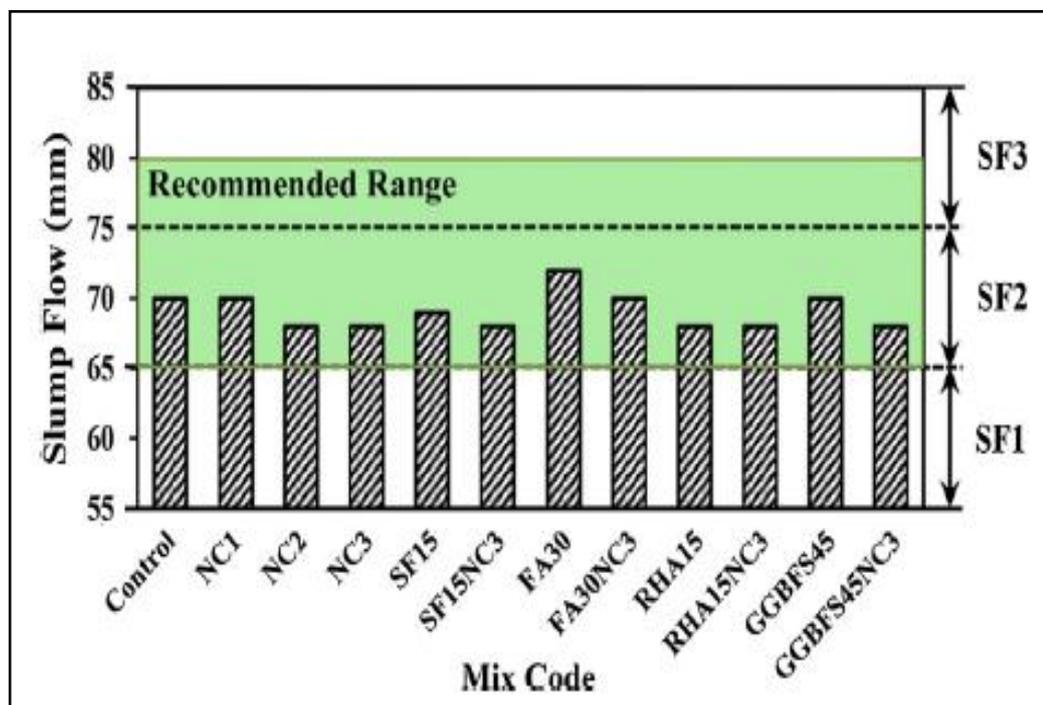


Figure 1.22 : Variation de l'étalement en fonction de la teneur en laitier [69]

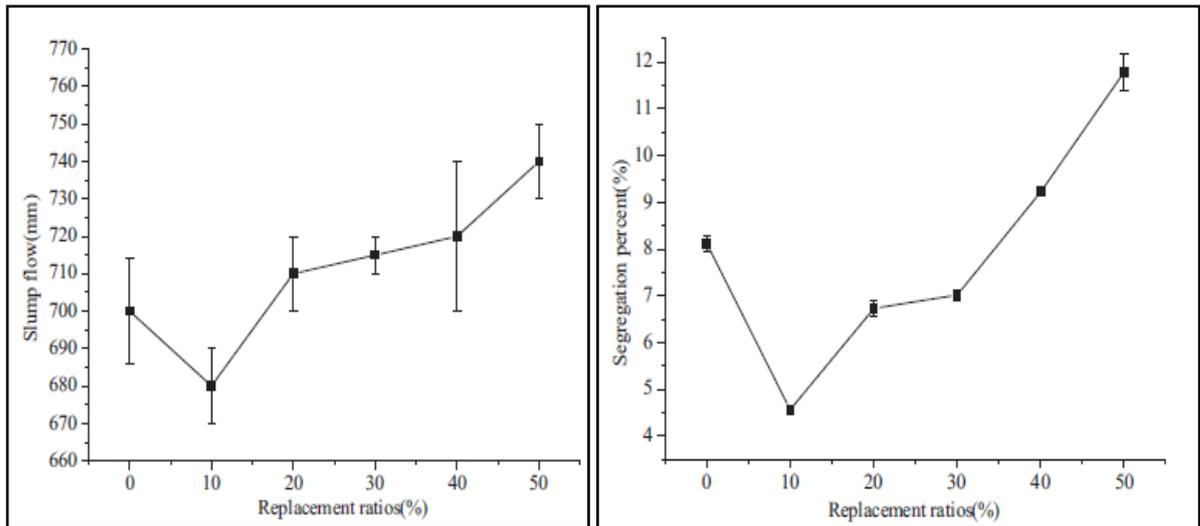


Figure 1.23 : Variation de l'étalement et de la ségrégation des BAP au laitier [70].

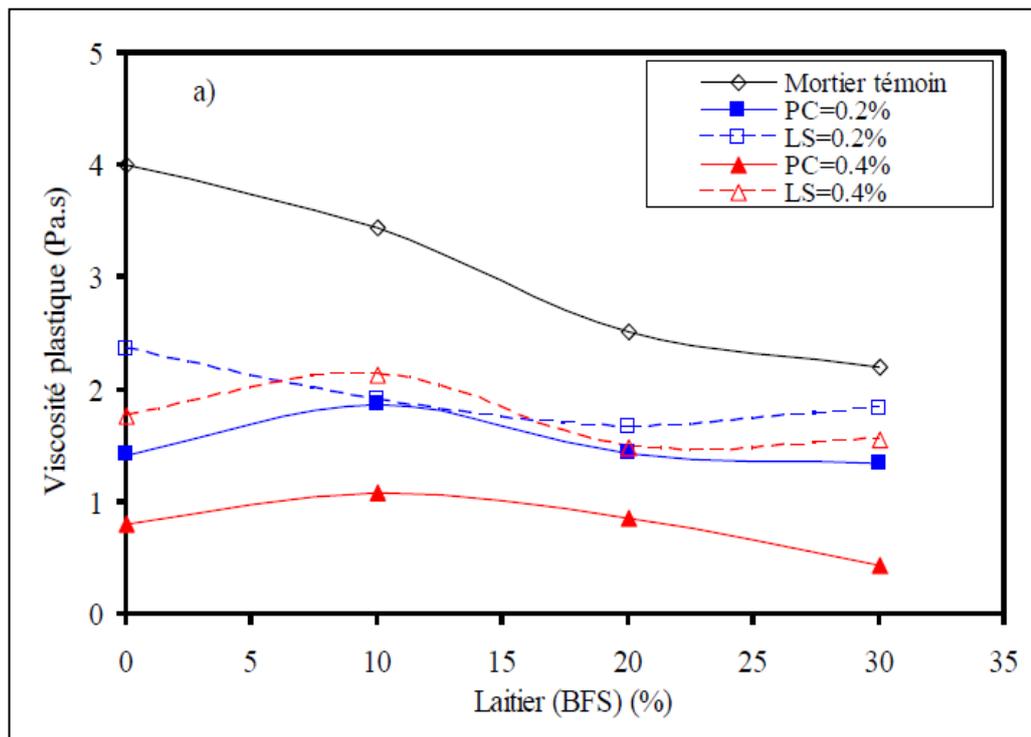


Figure 1.24 : Variation de la viscosité des mortiers au laitier [26].

Cependant, l'auteur a affirmé que le mortier contenant du laitier donne une variation croissante du seuil de cisaillement. En effet, il augmente de 25, 36 et 62% respectivement pour les mortiers contenant 10, 20 et 30% de laitier. Par ailleurs, Sethy et al. [71] ont

montré que l'ajout du laitier jusqu'à 90% provoque une diminution de la viscosité plastique des BAP conduisant ainsi à l'augmentation du diamètre d'étalement (Figure 1.25). Une autre étude sur l'influence du laitier sur les propriétés rhéologiques des BAP a été menée par Kouider Djelloul [72]. Il a été constaté que la viscosité diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier. Les auteurs ont noté une réduction de l'ordre de 25% et 39,2% pour un taux de substitution de 15% et 30% respectivement (Figure 1.26). Les résultats ont également prouvé que plus la quantité du laitier est importante, plus la valeur du seuil de cisaillement est faible avec un optimum de 15% dans le mélange. Une baisse de 19,10% et 33.60% a été noté pour une substitution de 15% et 30% respectivement. Les résultats sont conformes à ceux trouvés par Yahyaoui et al. [73] où les paramètres rhéologiques, diminuent avec l'accroissement du taux de substitution par le laitier. En effet, la viscosité diminue de 12,4 Pa pour les mélanges sans laitier à 8,75 Pa et 6,81 Pa pour les mélanges contenant 15% et 25% de laitier, respectivement. Alors qu'une baisse du seuil de cisaillement de 15,09 Pa.s à 10,37 Pa.s et 7,74 Pa.s a été remarquée pour une substitution de 15% et 25% de laitier, respectivement. Ahari et al. [74] ont montré, en étudiant des combinaisons d'additions binaire, ternaire et quaternaire que les valeurs de la viscosité plastique diminuent en introduisant de la fumée de silice et du laitier dans la composition des BAP comparé au béton de référence.

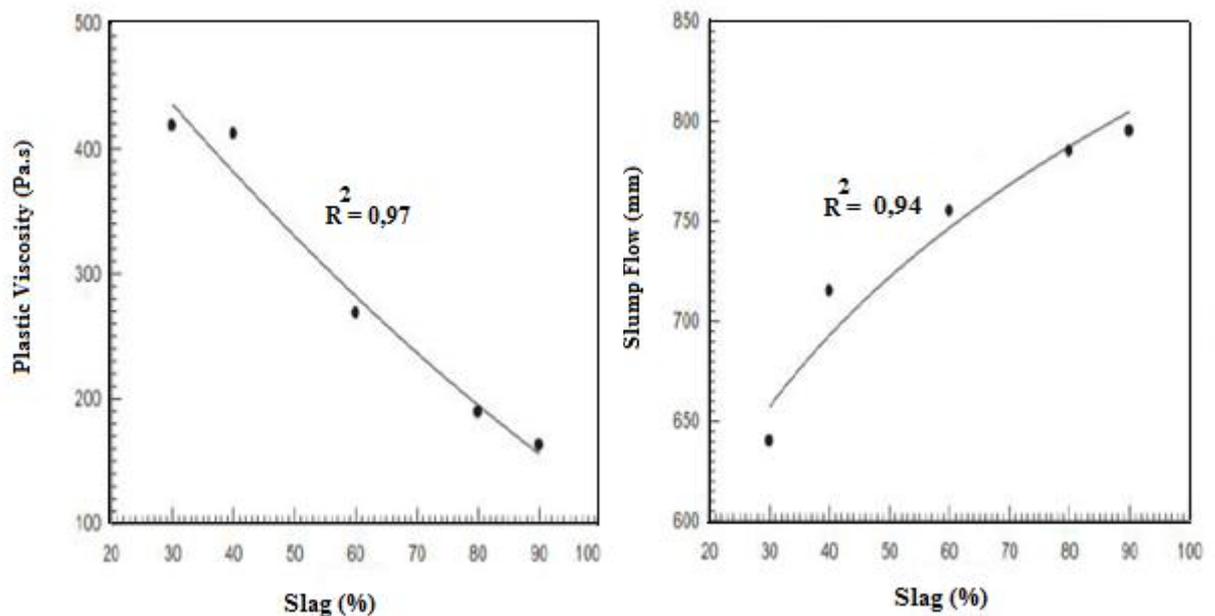


Figure 1.25 : Propriétés à l'état frais des BAP au laitier [71].

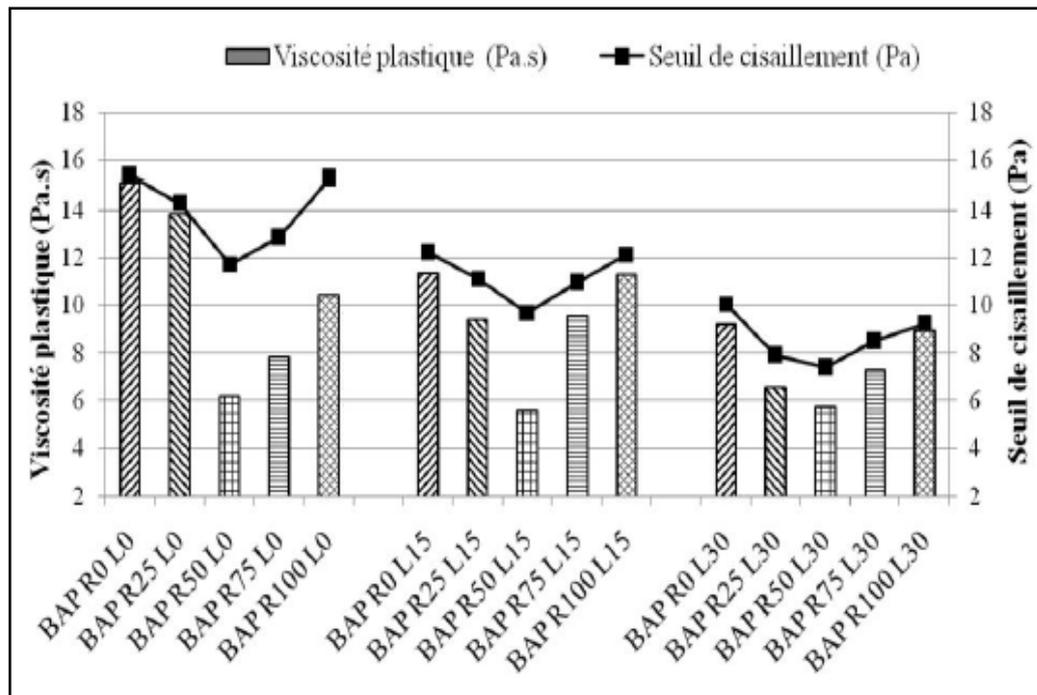


Figure 1.26 : Variation des paramètres rhéologiques en fonction de la teneur en laitier [72].

Des recherches faites par Mohan et Mini [75] affirment que l'incorporation de la fumée de silice dans les mélanges de béton conduit à une réduction de l'ouvrabilité. Cependant, cette addition améliore la stabilité du béton. Selon Adjoudj [26], les mortiers comportant des additions de fumée de silice, possèdent une viscosité plastique accrue avec le taux de substitution. Cette addition possède une grande finesse et une grande demande en eau, ce qui influe négativement sur la valeur de la viscosité. Ce résultat est similaire à celui trouvé par Faraj et al. [76], où l'ajout de la fumée de silice provoque une augmentation de la viscosité.

L'étude de l'influence des cendres volantes sur les performances des bétons à l'état frais a été le but de plusieurs recherches. Les travaux de Zhou et al. [77] ont conclu que la cohésion et la résistance à la ségrégation des BAP s'améliore avec l'incorporation d'un volume important de cendres volantes. Cependant, une substitution de 65% d'addition entraîne la ségrégation du béton. Afin d'améliorer la stabilité du béton, les auteurs ont proposé de réduire le rapport E/L ou diminuer le dosage en superplastifiant pour un taux de substitution 65%. De plus, il a été constaté que la demande en eau diminue avec l'introduction des cendres volantes (Figure 1.27). Ce résultat a été expliqué par une hydratation lente de l'addition. Une autre étude a été faite par Yang et al. [78] sur l'effet

des cendres volantes et de la poudre calcaire sur les propriétés rhéologiques des BAP. Leurs résultats ont affirmé que l'augmentation du taux de substitution des additions minérales dans les formulations de béton n'entraîne qu'une légère variation des propriétés rhéologiques. Alyoucef et al. [79] a observé que l'utilisation de la poudre de marbre améliore les propriétés des BAP à l'état frais en termes d'étalement et d'écoulement. Cependant, elle entraîne une diminution de la viscosité et du seuil de cisaillement. Lorsque les fillers calcaires sont ajoutés au béton, les propriétés rhéologiques résultant sont liées à la quantité incorporée, où il a été prouvé qu'après un certain seuil, la dégradation des comportements rhéologique est significative [80]. Selon d'autres publications [81-82], le filler calcaire semble avoir une faible influence sur la demande en eau, et peut conduire à une légère diminution de la viscosité du mélange cimentaire. Ceci peut justifier l'utilisation de cette addition à des dosages élevés dans la formulation des bétons.

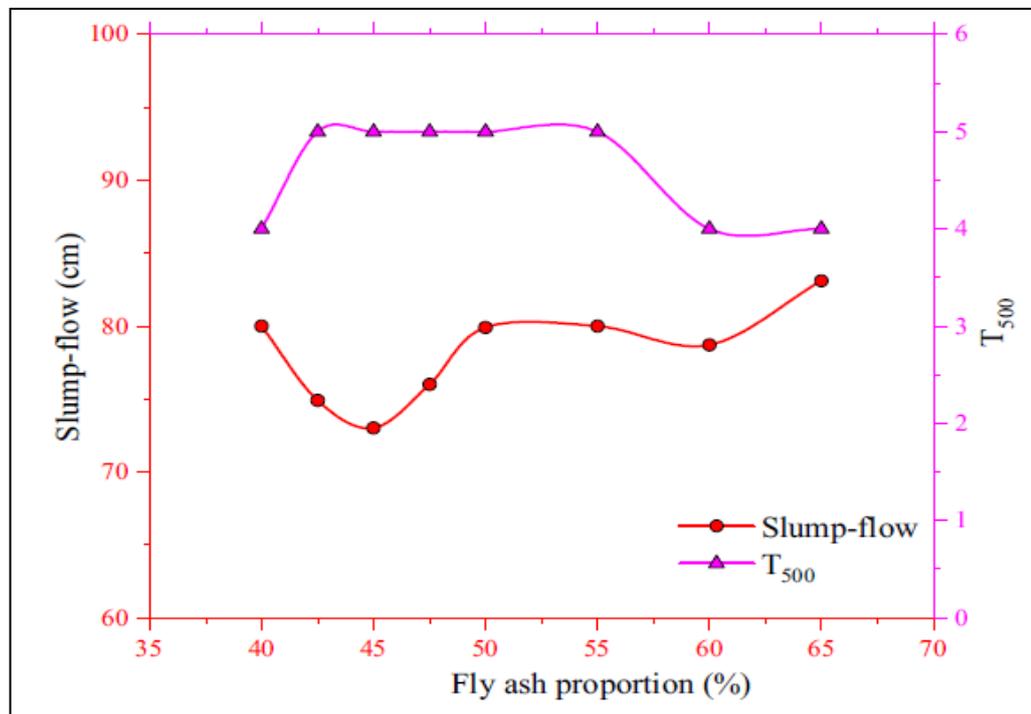


Figure 1.27 : Effet des cendres volantes sur l'étalement des BAP [77].

1.6.2. Influence de la finesse des ajouts minéraux

Il est clair que l'introduction des additions minérales dans les compositions de mortiers et bétons influence considérablement leur comportement rhéologique. Cet effet est lié à la

distribution de la taille des particules, la finesse et la composition minéralogique des additions minérales utilisées [26]. Belaidi et al. [43] ont constaté que l'action de la pouzzolane sur l'ouvrabilité est plus marquée pour des finesses élevées. En effet, ils ont rapporté que l'utilisation de faibles teneurs en pouzzolane naturelle ayant une surface spécifique élevée peut améliorer l'ouvrabilité.

Sur une étude de l'effet du laitier sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment, Luo et al. [83] ont conclu que le temps de prise diminue avec l'accroissement de la surface spécifique du laitier (Figure 1.28). Pour une substitution de 30%, le début de prise est atteint après 380 min pour le V1 (SSB : 2435 cm²/kg) et après 350 min pour le V2 (SSB : 3955 cm²/kg). Ce résultat a été expliqué par le fait que l'augmentation de la finesse du laitier engendre une accélération du processus d'hydratation [84]. Des observations similaires sont constatées dans les travaux de Saedi et al. [85] où ils ont affirmé que l'augmentation de la finesse du laitier conduit à une diminution du temps de début de prise des pâtes de ciment. Dans une autre étude [86], les auteurs ont constaté une diminution de la consistance normale des pâtes contenant du laitier de surface spécifique élevée (5000 cm²/g ou 6000 cm²/g) par rapport à celle contenant du laitier d'une finesse 3000 cm²/g. Omar et al. [87] étudient l'effet du laitier sur les propriétés des BAP à l'état frais et constatent que l'augmentation de la surface spécifique de l'addition entraîne une diminution des valeurs d'étalement (Figure 1.29). Ce comportement a été expliqué par une forte consommation d'eau par les grains de laitier de grande surface spécifique.

Des conclusions ont été tirées par Park et al. [88] où ils ont constaté que l'augmentation de la surface spécifique du laitier à 5962 cm²/g par rapport à celle du ciment (3290 cm²/g) entraîne une diminution de la viscosité plastique des pâtes liantes. Cela a été expliqué par l'apparition de petites particules sphériques de laitier (taille moyenne 8,07 µm) entre de grosses particules de ciment (taille moyenne 18,07 µm). Dans le même contexte, Atzeni et al. [89] et Wu et Roy [90] ont constaté que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique peuvent augmenter ou diminuer avec un additif de laitier, cela dépend de la relation entre la surface spécifique du ciment et du laitier.

Les travaux de Bendjeddou et al. [91] illustrés sur la figure 1.30 montrent que le temps d'écoulement augmente avec l'accroissement de la surface spécifique des fillers calcaires.

En effet, les auteurs ont observé que l'augmentation de la finesse de $3060 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $9440 \text{ cm}^2/\text{g}$ conduit à une augmentation du temps d'écoulement de 26 s à 45 s respectivement.

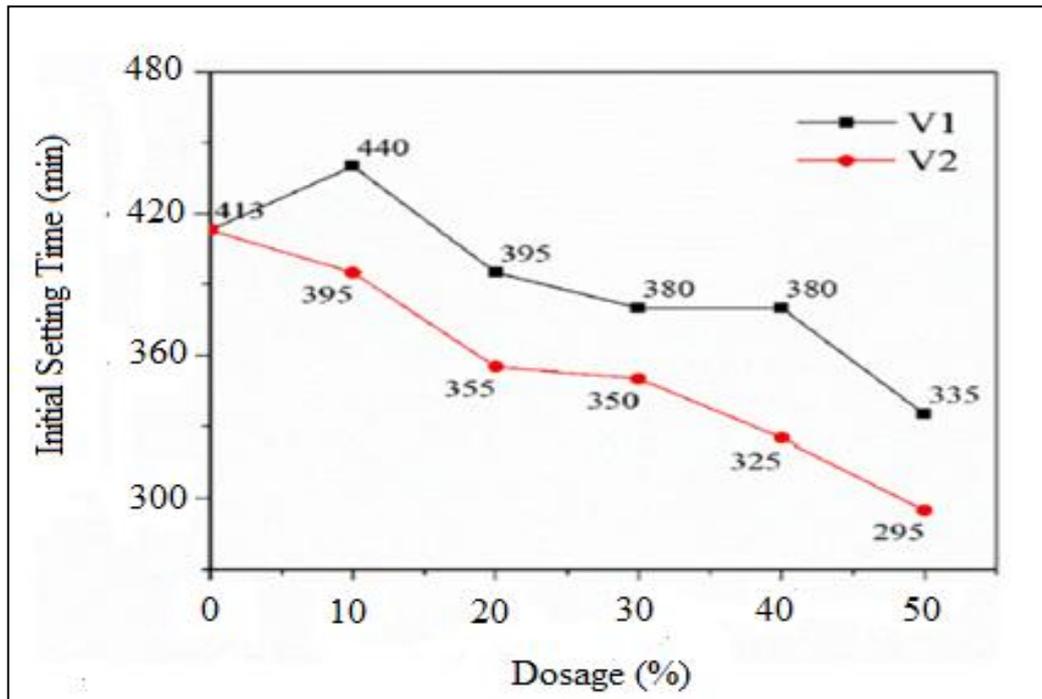


Figure 1.28: Variation du temps de prise en fonction de la finesse du laitier [83].

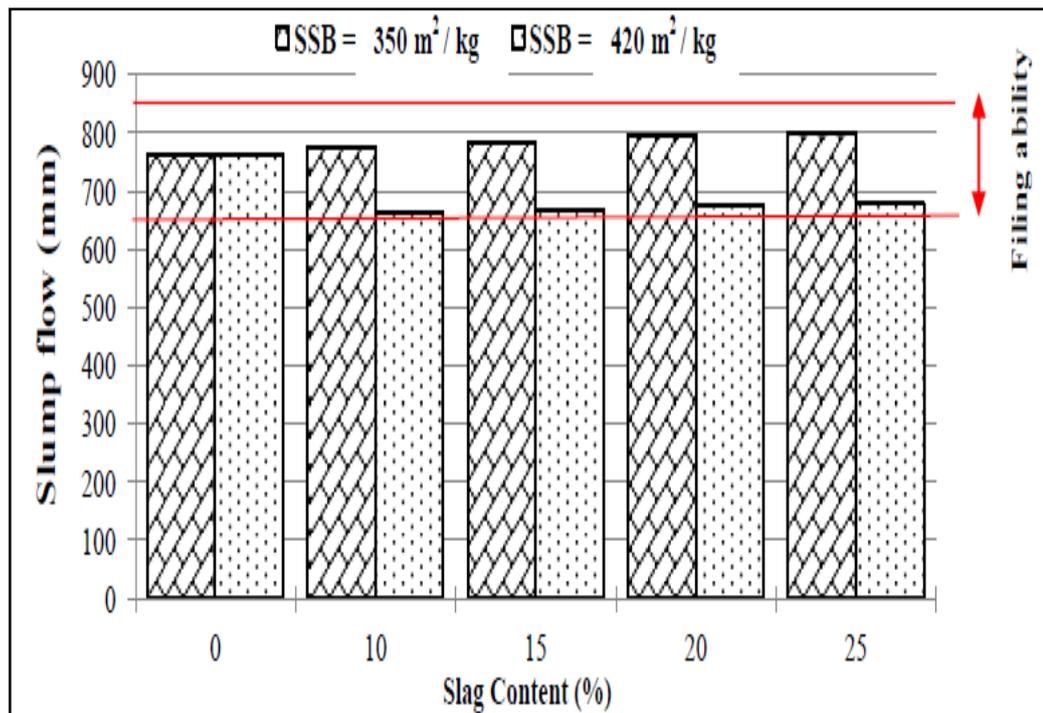


Figure 1.29 : Etalement des BAP à base de laitier de différentes fineses [87].

Ce résultat a été expliqué par le fait que l'augmentation de la finesse de l'addition conduit à l'apparition de frottements entre les grains causée par l'augmentation de la surface de contact et la diminution des distances intergranulaires. De plus, il a été constaté que la viscosité du coulis a tendance à augmenter avec l'augmentation de la surface spécifique des fillers calcaire qui affecte le comportement rhéologique du coulis et notamment son temps d'écoulement. La viscosité a été trouvée égale à 261 MPa et 441 MPa pour les coulis contenant des fillers calcaire d'une finesse de 3060 cm^2/g et 9440 cm^2/g respectivement. El Hilali [92] a remarqué que la finesse des fillers calcaires influe de manière significative sur le comportement rhéologique de la pâte de ciment. En effet, il a montré que la viscosité des pâtes autoplçantes diminue avec l'augmentation de la finesse des additions calcaires, ce qui implique une réduction du seuil de cisaillement des pâtes de ciments.

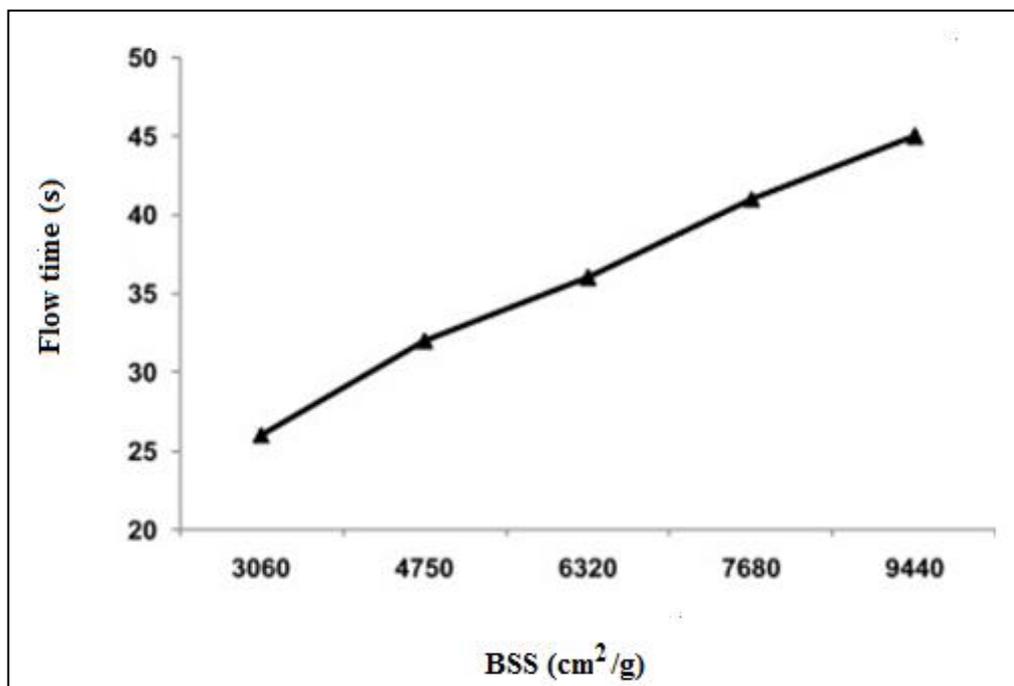


Figure 1.30 : Influence de la finesse des fillers calcaires sur le temps d'écoulement [91].

1.7. Conclusion

Cette étude bibliographique a mis en évidence les différentes méthodes utilisées pour la formulation des BAP ainsi que les propriétés relatives à sa maniabilité et ses propriétés rhéologiques. La formulation des BAP et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en

œuvre nécessitent une attention spécifique. En effet, Le BAP doit harmoniser des propriétés contradictoires : fluidité et déformabilité d'un côté, et stabilité de l'autre. Pour satisfaire ces exigences simultanément, sa formule doit comporter une quantité importante de pâte et un pourcentage de superplastifiant. La nature, la teneur et la finesse des ajouts minéraux utilisés dans leurs compositions peut influencer considérablement leurs caractéristiques à l'état frais en améliorant leur ouvrabilité et leurs caractéristiques rhéologiques. Par conséquent faciliter la mise en œuvre tout en conservant leur stabilité.

Peu d'études ont été réalisées sur l'effet de la finesse de la pouzzolane naturelle et du laitier sur le comportement des BAP à l'état frais. Une étude de la finesse de ces deux ajouts cimentaires sera réalisée et discutée dans le chapitre 4.

CHAPITRE 2

INFLUENCE DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES PERFORMANCES DES BETONS ET MORTIERS AUTOPLACANTS

2.1. Introduction

Dans le présent chapitre, une synthèse bibliographique sur les mécanismes d'hydratation des liants est présentée. L'effet des additions minérales sur les propriétés des bétons et mortiers à l'état durci à savoir les résistances mécaniques, les propriétés physico-chimiques et de durabilité est également exposé dans cette partie.

2.2. Mécanisme d'hydratation des ciments

Les ciments sont des poudres finement broyées qui avec le contact d'eau font prise et durcissent sous des processus physico-chimiques. Ils sont obtenus par le broyage d'un mélange de clinker et d'environ 3 à 5% de gypse dont le rôle est de réguler la prise du ciment. Le clinker est obtenu à partir de la cuisson à une température voisine de 1450 °C d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion moyenne de 80 et 20%. Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile : silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3), se combinent avec la chaux (CaO) provenant du calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux. Pendant la cuisson, ces oxydes réagissent entre eux, dans leurs états solides, pour former les minéraux du clinker qui sont :

- Le silicate bicalcique (Bélite) : $2 \text{CaO}, \text{SiO}_2$ ou par abréviation C2S,
- Le silicate tricalcique (Alite) : $3 \text{CaO}, \text{SiO}_2$ ou par abréviation C3S,
- L'aluminate tricalcique (Célite) : $3 \text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$ ou par abréviation C3A,
- L'alumino-ferrite tetracalcique (Célite) : $4 \text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ ou par abréviation C4AF.

Le ciment Portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, d'autres constituants peuvent remplacer une partie du clinker tels que : les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes, les pouzzolanes, les fillers.

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 dans lequel les principaux composés du ciment C_3S , C_2S , C_3A , et C_4AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau. Les réactions d'hydratation sont accompagnées d'un dégagement de chaleur donnant une indication sur l'avancement du processus d'hydratation.

- Hydratation des silicates

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (C_3S) et les silicates bicalciques (C_2S) se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($Ca(OH)_2$). Dans le cas du C_2S , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de portlandite formée est plus faible.

- Hydratation des aluminates

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

Etape 1 : Formation d'ettringite

Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite. Cette réaction est fortement exothermique. Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment alors une couche protectrice autour du grain.

Etape 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 mono sulfate de calcium hydraté (C_4ASH_{12}). Les réactions chimiques s'intensifient.

Etape 3 : Hydratation des aluminates résiduels

Au bout de quelques semaines, en général, l'ettringite se transforme totalement en monosulfo-aluminate. 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. 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.

2.3. Influence des additions minérales sur les propriétés mécaniques des BAP et MAP

Plusieurs facteurs combinés peuvent influencer la résistance du béton. En effet, Les spécificités de formulation des bétons et mortiers autoplaçants (volume de pâte important, dosage élevé en additions minérales) liées à leurs exigences de mise en œuvre pourraient modifier leur comportement mécanique à l'état durci, comparativement aux bétons vibrés. Les additions minérales peuvent réagir chimiquement en milieu cimentaires pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire et confèrent aux bétons des propriétés mécaniques accrues et une meilleure durabilité.

2.3.1. Résistance à la compression

Les résistances mécaniques projettent généralement une image globale de la qualité d'un béton. La résistance à la compression d'un BAP est directement liée à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment, elles dépendent aussi de la composition et du dosage du liant. Les BAP se caractérisent par une résistance à la ségrégation plus élevée comparé au BV. Par conséquent, ils possèdent une structure plus homogène et plus compacte conférant ainsi une amélioration des résistances mécaniques. Selon Klug et Holchemacher [93], les BAP montrent des résistances plus élevées pour un même rapport Eau/Ciment comparées à celles des bétons traditionnels. D'après Domone [94], le type et la proportion d'addition utilisée influence la résistance en compression. Felekoglu et al. [95] a également déclaré que la variation des résistances en compression des BAP est en fonction de la nature et du dosage du liant. Par ailleurs, les auteurs ont montré que les résistances au jeune âge sont modérées lorsque le BAP contient des teneurs élevées d'additions pouzzolaniques. D'autres recherches menées par Chabi et al. [96] ont montré qu'au-delà de l'âge de 28 jours (à 90 jours), le taux d'augmentation de la résistance à la compression des mortiers contenant de la pouzzolane et de laitier est de l'ordre de 86% et 68% par rapport au mortier témoin (Figure 2.1). Les travaux de Deboucha et al. [97] illustrés sur la figure 2.2 montrent que l'incorporation de la pouzzolane naturelle dans les compositions de mortier entraîne une diminution de la résistance en compression comparé à celle du mortier témoin. Cette réduction est beaucoup plus prononcée pour une

substitution de 30% et 40%. Pour un taux de 40% de pouzzolane, la résistance en compression mesurée à 28 et 90 jours est de l'ordre de 27,5 MPa et 36,4 MPa respectivement comparé à celle du mortier control où la résistance est de 50,75 et 58,4 MPa à 28 et 90 jours respectivement.

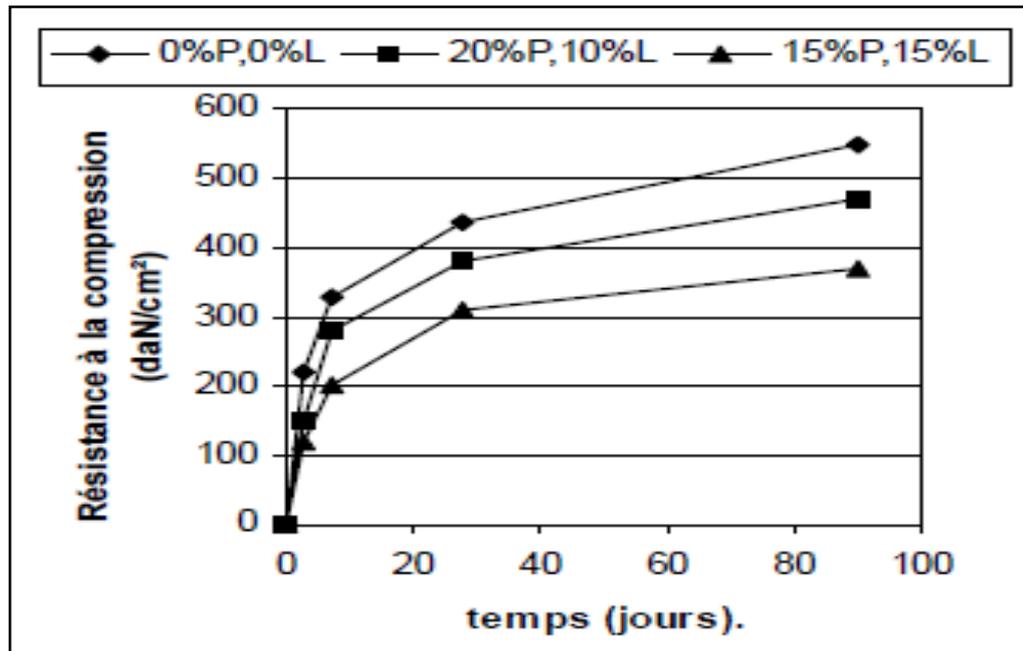


Figure 2.1: Résistance à la compression en fonction de la teneur de pouzzolane et de laitier [96].

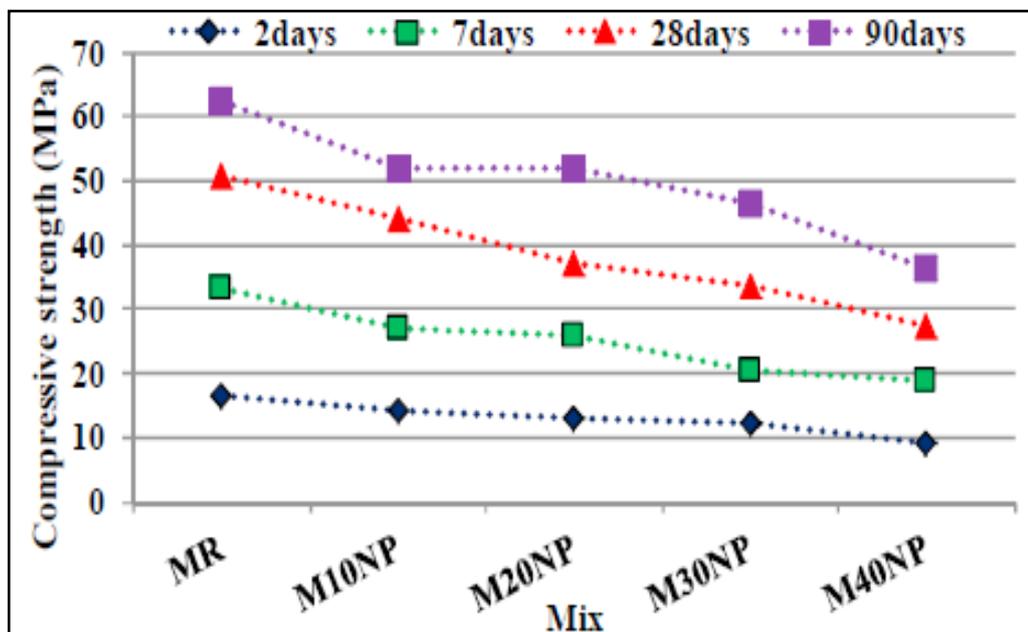


Figure 2.2: L'effet de la pouzzolane naturelle sur la résistance en compression des mortiers [97].

Des résultats similaires ont confirmés qu'à l'âge de 90 jours la résistance en compression diminue de 9%, 11% et 17% lorsque le ciment est substitué par 15%, 20% et 25% de pouzzolane naturelle respectivement [98]. Des travaux menés par Belaidi et al. [43] sur l'effet de la pouzzolane naturelle et de la poudre de marbre sur les propriétés des BAP ont montré que la substitution d'une partie du ciment par de la pouzzolane naturelle dans une formulation de béton conduit à la réduction des résistances en compression (Figure 2.3). Cette diminution est beaucoup plus importante à jeune âge. A 90 jours, les résistances sont comparables à celle du béton de référence. Une autre recherche [38] a confirmé que l'augmentation de la teneur en pouzzolane dans les compositions de mortier a un effet négatif sur la résistance en compression à jeune âge (Figure 2.4). D'après les auteurs, à long terme et pour une substitution de 20%, la résistance en compression est comparable à celle du mortier témoin. Dans le même contexte, Dif et al. [99] ont conclu que la résistance en compression diminue avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane (Figure 2.5). Cette remarque a été notée à jeune âge et à moyen terme. Cependant, les résultats ont révélé qu'au-delà de 90 jours, les bétons contenant 10% et 20% de pouzzolane développent des résistances supérieures à celle du béton de référence. Cela a été expliqué par le développement des réactions pouzzolaniques à long terme.

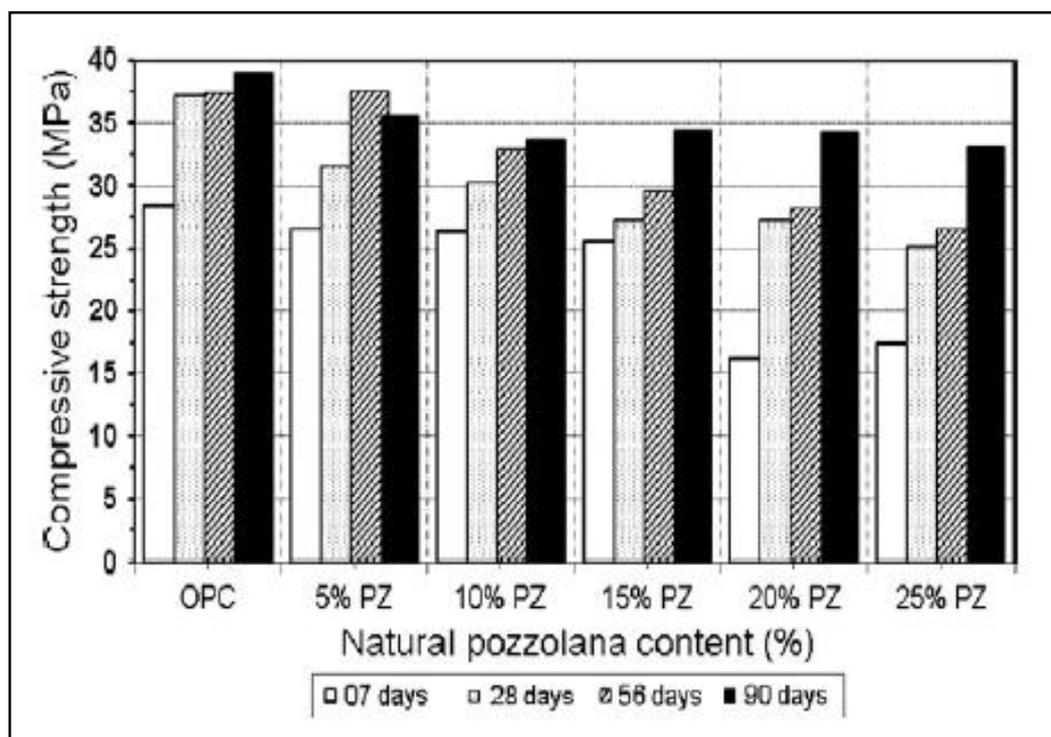


Figure 2.3: Résistance en compression des BAP à base de pouzzolane naturelle [43].

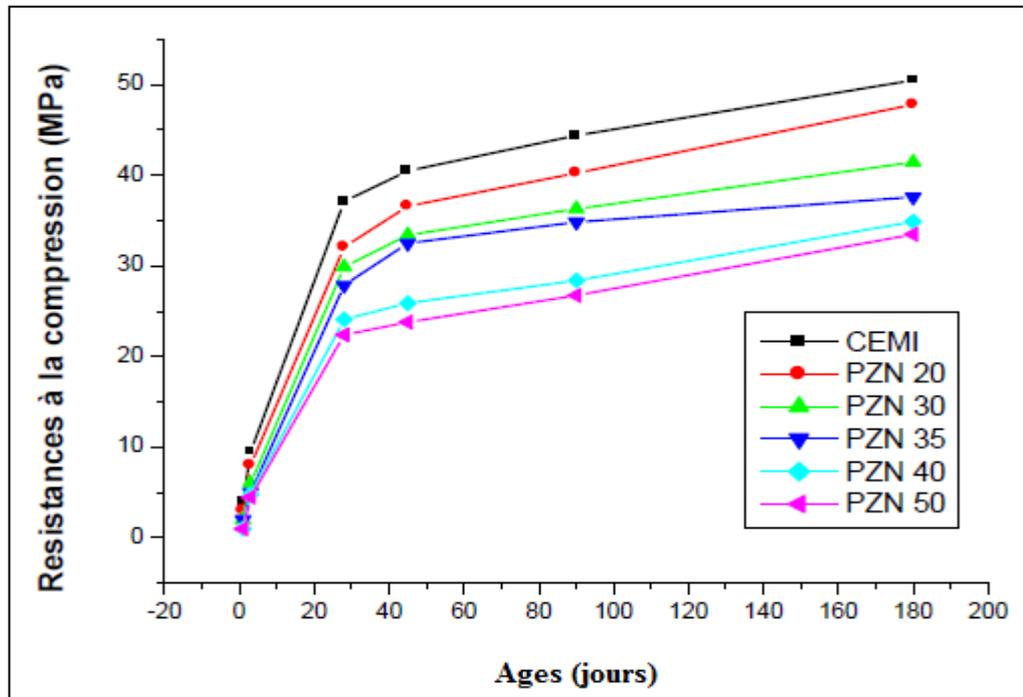


Figure 2.4: Evolution de la résistance en compression des mortiers binaires [38].

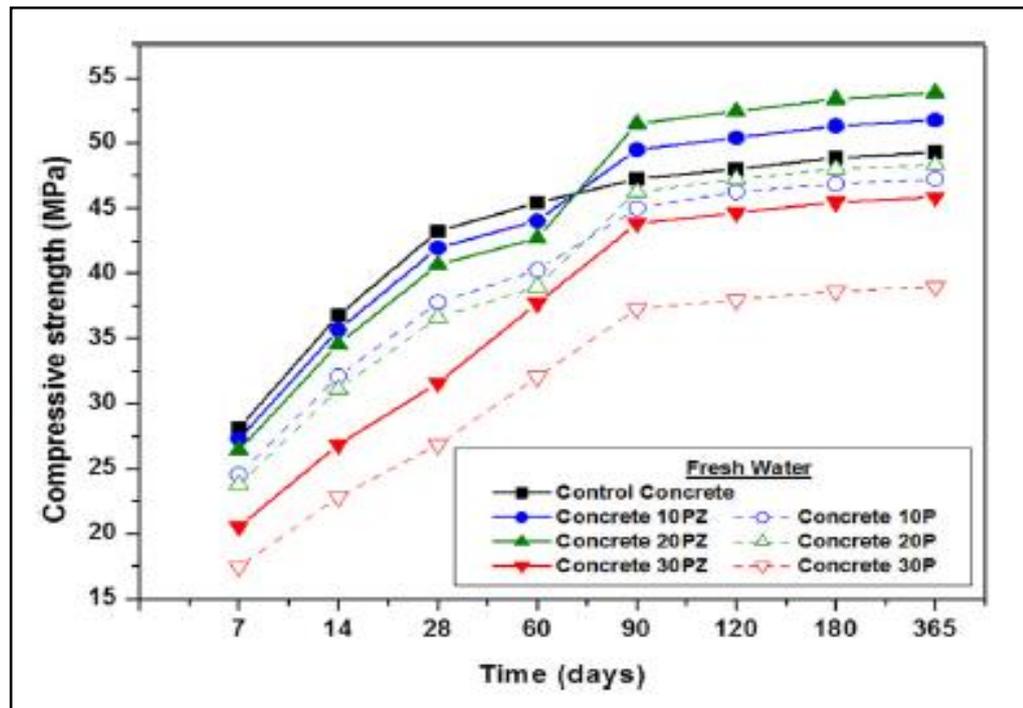


Figure 2.5: Résistance en compression des bétons contenant de la pouzzolane [99].

En étudiant les performances des BAP à base de pouzzolane naturelle et de granulats recyclés, Omrane et al. [100] ont également observé l'effet négatif de la pouzzolane naturelle sur les résistances en compression. Cet effet a été noté quelque soit l'âge de

conservation (Figure 2.6). D'autres travaux [101] ont été menés sur l'effet de la pouzzolane et des déchets industriels sur les propriétés des BAP. D'après les résultats illustrés sur la figure 2.7, les auteurs ont confirmé qu'il est possible de produire des BAP ternaire de grandes résistances de l'ordre de 83 MPa à 90 jours en présence de pouzzolane.

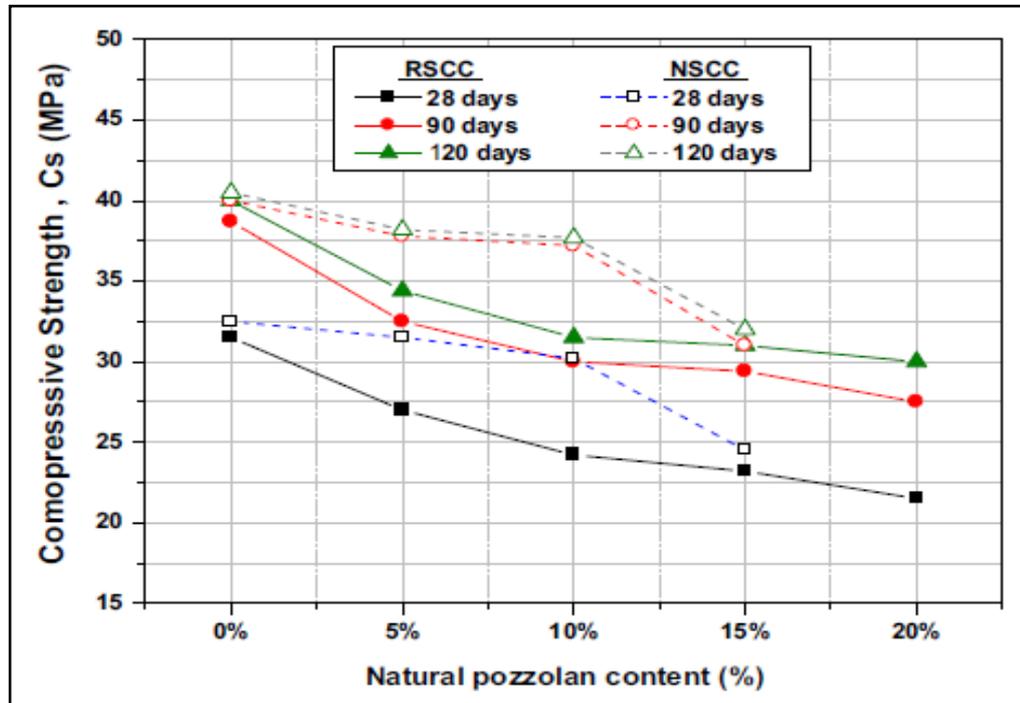


Figure 2.6: Influence de la pouzzolane sur la résistance en compression des BAP [100].

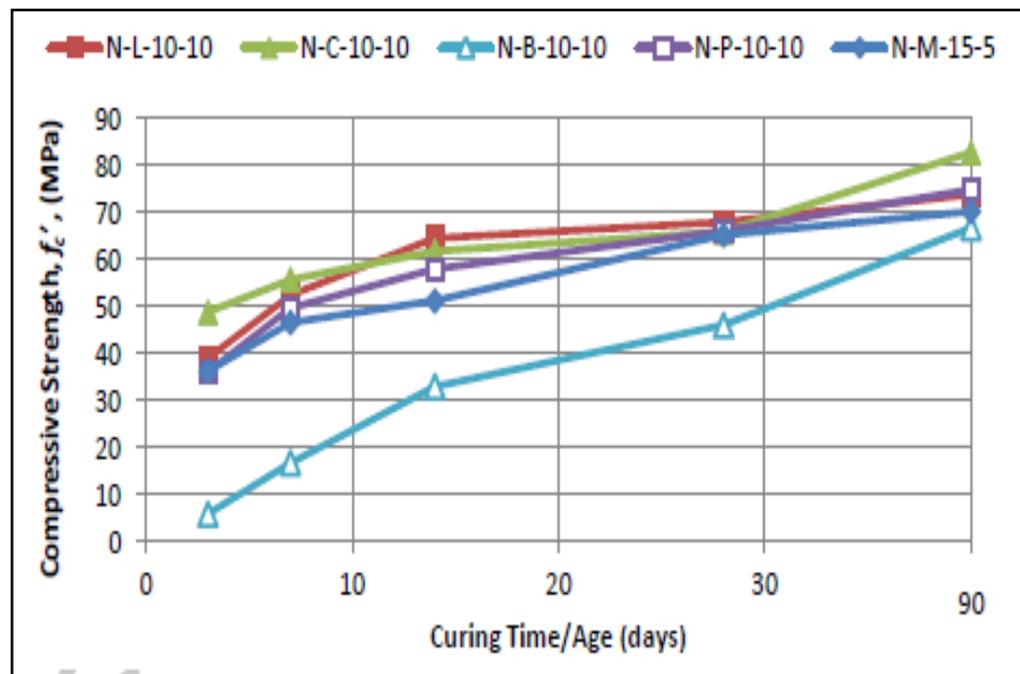


Figure 2.7: Evolution de la résistance en compression des BAP [101].

Boukendakdji et al. [55] ont mené une étude sur le comportement rhéologique et mécanique des BAP en modifiant le taux de substitution du ciment par le laitier (0, 10 et 15%). Les auteurs ont observé que l'augmentation du taux de substitution conduit à une diminution de la résistance en compression à jeune âge. Ces résultats ont été confirmés par Kim et al. [102]. Néanmoins, des résistances comparables à celle du béton de référence ont été notées à l'âge de 56 et 90 jours [55] (Figure 2.8). Des résultats similaires sont constatés dans les travaux d'Omar et al. [103] où l'addition de laitier dans la composition des BAP a un effet positif sur le développement des résistances à long terme (90 jours) comparé au béton témoin. Les travaux d'Alaa [58] illustrés sur la figure 2.9 montrent que l'incorporation d'un volume important de laitier dans les compositions des pâtes de ciment, mortier ou bétons engendre une baisse significative des résistances mécaniques à 28 et 56 jours. Une réduction de l'ordre de 45.82%, 60.71%, 80.69% et 79.74% a été enregistrée à 28 jours lorsque le ciment est substitué de 85%, 90%, 95% et 100% de laitier respectivement. Les auteurs confirment également qu'à long terme, les compositions au laitier peuvent avoir des résistances comparables à celle du mortier ou béton témoin. L'écart de résistances entre les différents mélanges dépend de plusieurs facteurs tels que la teneur, la finesse et l'activité de l'addition [58].

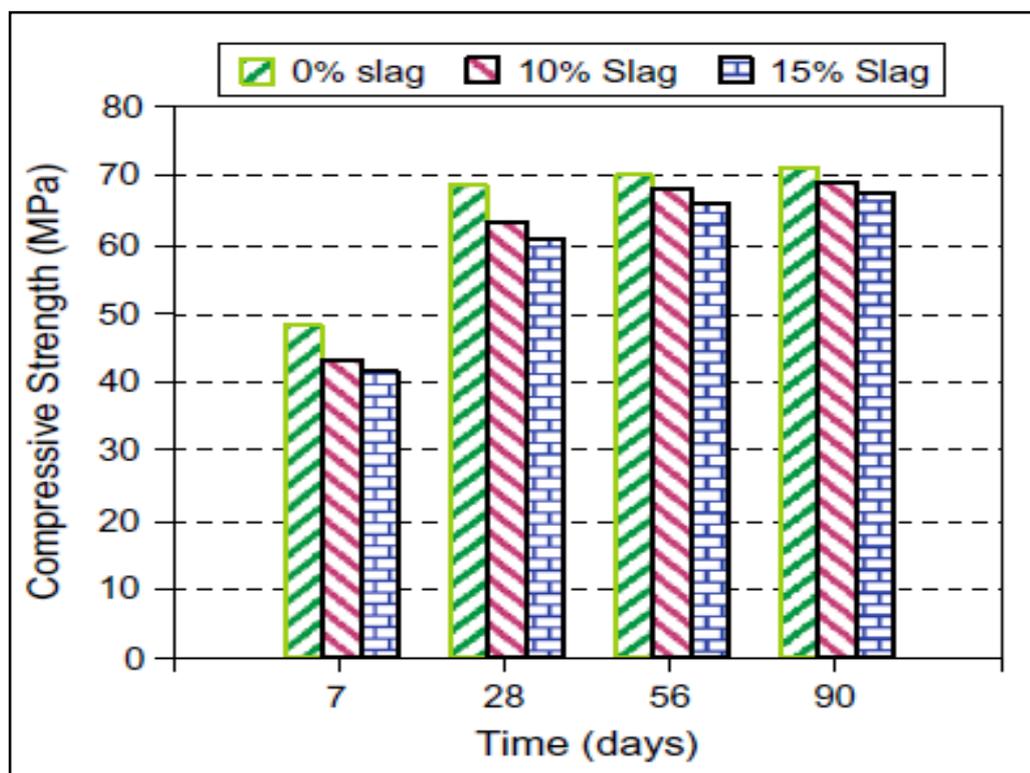


Figure 2.8: Variation de la résistance en compression des BAP [55].

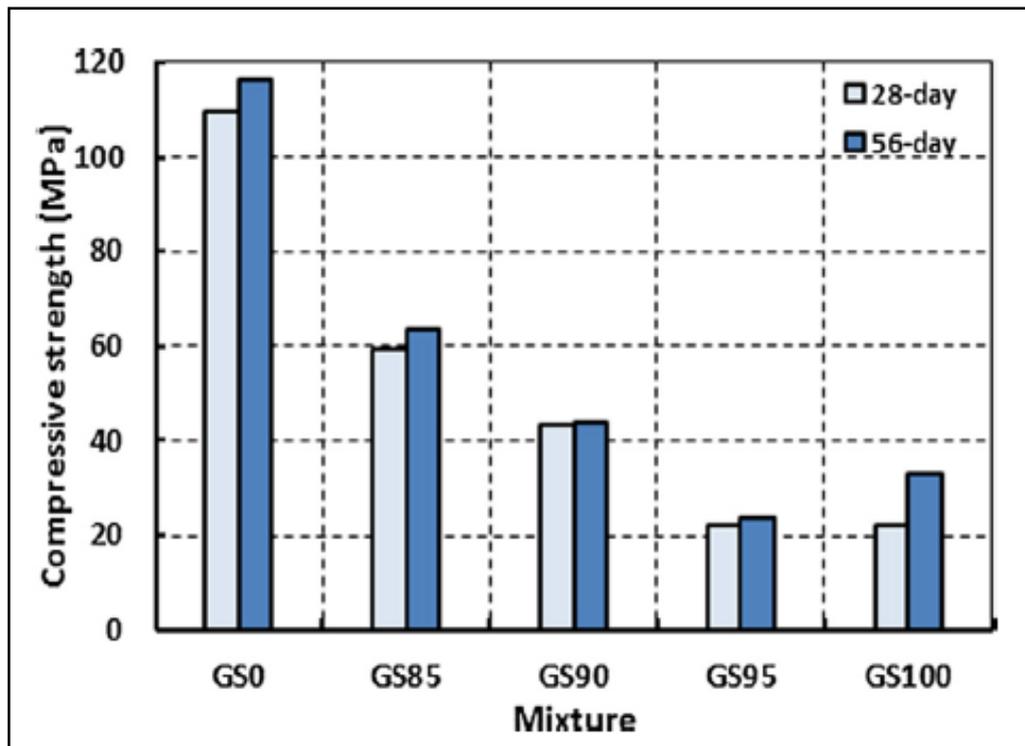


Figure 2.9 : Résistance en compression des pâtes de ciment à base de laitier [58].

D'autres recherches sur l'effet des cendres volantes et du laitier sur les propriétés mécaniques des bétons autoplaçants [104] ont confirmé que la résistance en compression des BAP au laitier est légèrement inférieure à celle du béton de référence. Les auteurs ont également indiqué que l'augmentation de la teneur en laitier (de 35% à 50 ou 70%) n'a pas un effet significatif sur la résistance mécanique à jeune âge. Cependant, les résultats ont montré que la substitution de 70% de ciment par des cendres volantes et du laitier (35% cendres volantes et 35% de laitier) entraîne une réduction de la résistance du béton comparé à celui contenant 70% de laitier uniquement (Figure 2.10).

De même, Aseel et al. [105] mentionnent qu'à 28 jours, la résistance en compression des BAP diminue linéairement en présence de cendres volantes. Cependant, une amélioration des résistances a été notée avec l'accroissement de la teneur en laitier (de 0 à 40%). Une augmentation de l'ordre de 40% a été enregistrée (Figure 2.11).

Pan et al. [70] ont étudié l'influence du laitier sur les BAP à base de granulats recyclés. Leur résultats montrent qu'à jeune âge, la résistance en compression des BAP au laitier est relativement faible comparé au béton de référence.

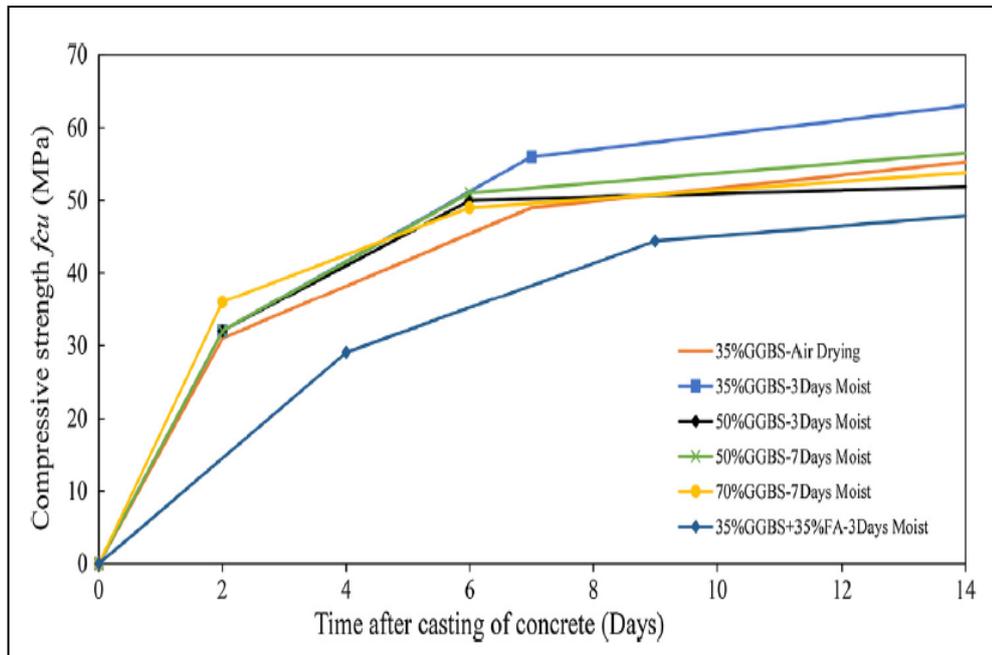


Figure 2.10 : Résistance en compression des BAP au laitier [104].

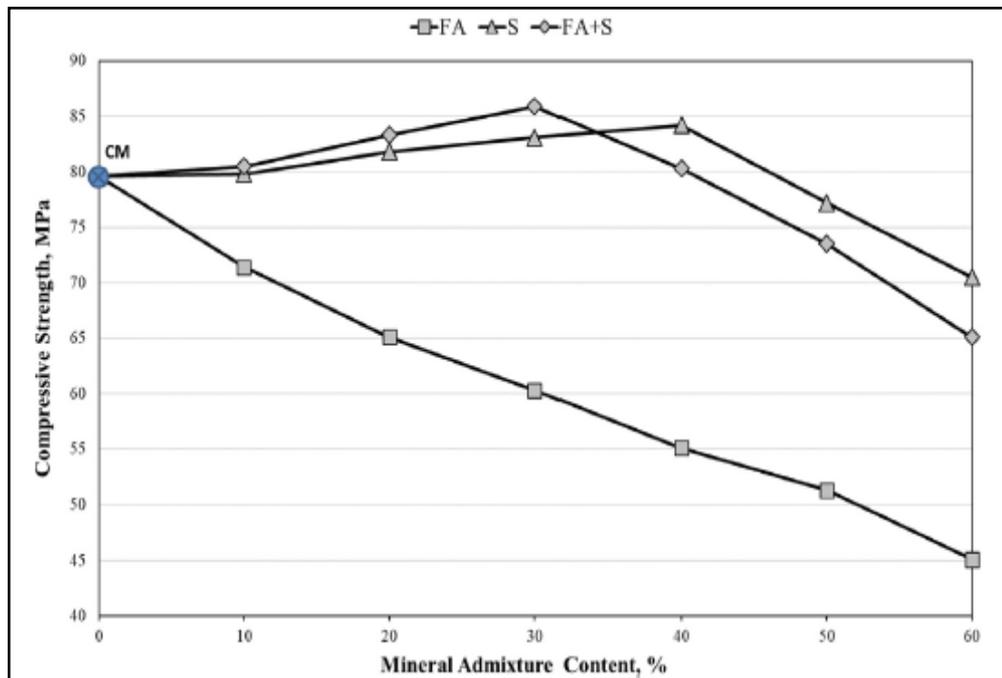


Figure 2.11 : Résistance en compression des BAP à base des additions minérales [105].

Cependant, les auteurs affirment qu'à long terme, une résistance maximale est enregistrée pour un taux de substitution de 10% de laitier (Figure 2.12). Dinakar et al. [106] ont affirmé que des teneurs élevées de laitier allant jusqu'à 80% peuvent être utilisées dans les compositions de BAP.

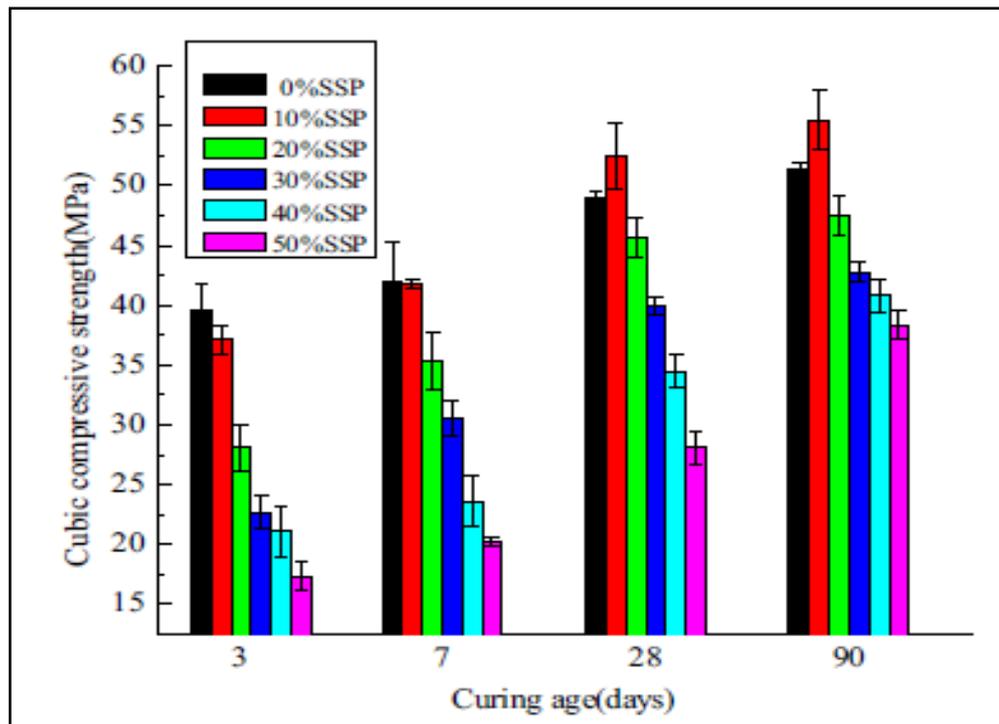


Figure 2.12 : Influence de la teneur en laitier sur la résistance en compression des BAP à base de granulats recyclés [70].

De même, d'autres études expérimentales [62] ont confirmé que des résistances de l'ordre de 60 à 100 MPa peuvent être développées avec une substitution de 30 à 60% de laitier. D'autres recherches [107] sur les propriétés mécaniques des liants ternaires ont montré que la combinaison des fillers calcaire et du laitier de haut fourneau est complémentaire. En effet, il a été conclu que la résistance des liants est améliorée à jeune âge en présence des calcaires tandis que l'addition du laitier est bénéfique sur la résistance en compression à longues échéances. Les auteurs ont trouvé une combinaison optimale renfermant 70% de ciment portland, 20% de laitier et 10% de filler calcaire. Par ailleurs, Ali-Boucette [108] affirme une réduction de la porosité en présence du laitier parallèlement à l'augmentation de la durée de cure causée principalement par la densification de la matrice cimentaire par effet hydraulique et pouzzolanique, significatifs au-delà de 28 jours, conduisant ainsi à l'obtention de meilleures résistances à long terme. Manjunath et Matur [109] expliquent l'amélioration des résistances en compression en présence d'une teneur de laitier entre 700 et 900 kg/m³ par la formation d'hydrates C-S-H et C-A-S-H supplémentaires et par la densification de la microstructure des bétons au laitier. Selon les résultats de Zhanggen et al. [110], les compositions quaternaires contenant un taux de 50% de cendres volantes, de fumée de silice et du laitier présentent des résistances supérieures à celles du BAP de

référence. Une augmentation de 12,6% a été enregistrée. Les auteurs expliquent ce fait par la réaction pouzzolanique et la synergie entre les additions minérales de différentes finesses.

Il est bien établi que les résistances mécaniques sont considérablement affectées par le type d'addition et la teneur de substitution au ciment. En effet, Boukhelkhal et al. [111] signalaient que l'utilisation de 5% de poudre de marbre ou de poudre de brique comme substitution au ciment améliore les propriétés mécaniques des MAP. En revanche, lorsque le taux de substitution dépasse les 15%, une dégradation des résistances en compression a été observée. Les auteurs ont également constaté que les performances des MAP sont meilleures avec un additif de métakaolin. Similaires observations ont été aussi révélées par Anhad et Rafat [112], où les auteurs ont constaté que l'utilisation du métakaolin est bénéfique pour la résistance en compression. Une augmentation de l'ordre de 27%, 42% et 48% a été notée à 28, 90 et 365 jours respectivement comparé au béton témoin. Dans le même contexte, Paulo et al. [113] ont conclu que l'introduction des cendres volantes dans les compositions de BAP augmentait la résistance en compression à long terme de 2%.

La surface spécifique des additions minérales peut avoir un rôle prédominant dans l'amélioration des performances mécaniques des mortiers et bétons. En effet, Nguyen et al. [114] ont constaté que la finesse de la pouzzolane naturelle affecte significativement l'activité pouzzolanique. Les résultats obtenus ont confirmé que cette dernière augmente avec l'augmentation de la surface spécifique de l'addition. D'autre part, les travaux de Lawrence [115] sur l'influence du type, la teneur et la finesse des additions minérales sur la résistance en compression des mortiers mettent en évidence que l'hydratation est accélérée avec l'augmentation de la surface spécifique de la pouzzolane et par conséquent l'amélioration de la résistance en compression (Figure 2.13). Cependant, Khan et al. [116] ont montré que l'augmentation de la finesse de la pouzzolane naturelle (de 1800 cm²/g à 3400 cm²/g) n'a pas un effet significatif sur l'évolution de la résistance en compression (jusqu'à 200 jours d'âge).

L'amélioration de la réactivité des additions minérales est assurée par l'augmentation de la surface spécifique obtenue par un broyage fin [117]. Des résultats ont confirmé que plus la finesse de broyage du laitier est importante plus ce dernier est réactif, conduisant ainsi à l'accélération de la cinétique des réactions d'hydratation [118].

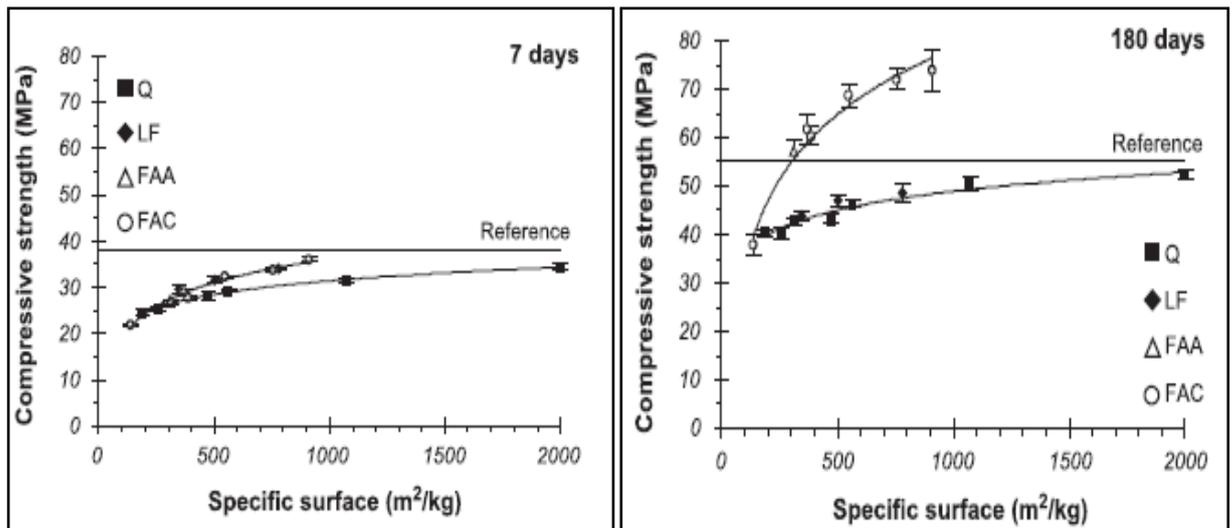


Figure 2.13: Influence de la finesse des additions minérales sur la résistance en compression des mortiers [115].

Hallet et al. [117] ont montré qu'à un âge précoce, l'augmentation de la surface spécifique n'a pas un effet important sur le développement des résistances. En revanche, à des âges plus avancés, la résistance en compression augmente d'une manière significative avec l'accroissement de la finesse du laitier. Ce phénomène a été expliqué par une formation accrue de produits d'hydratation supplémentaires causée par des finesse plus élevées. De plus, Benkendorff [119] a signalé que les résistances en compression peuvent être améliorées en augmentant la finesse du laitier de 2800 à 5100 cm²/g. Binici et al. [120] ont remarqué que la finesse du laitier influe d'une manière significative l'évolution de la résistance des pâtes de ciment. En effet, les auteurs ont montré que la résistance en compression augmente avec l'augmentation de la surface spécifique de l'addition (Figure 2.14). Des résistances de l'ordre de 19, 23.4 et 28.8 MPa ont été notées pour des finesse de 250, 400 et 500 m²/kg, respectivement. Ce comportement a été expliqué par l'augmentation de l'activité pouzzolanique avec l'accroissement de la finesse de l'addition. Similaires observations ont été révélées par Saedi et al. [85] où une amélioration des performances mécaniques des bétons a été observée avec l'augmentation de la finesse du laitier (Figure 2.15). Les auteurs ont justifié ce résultat par une hydratation plus rapide et plus complète provoquée par l'augmentation de la surface spécifique de l'addition. De plus, Miura et Iwaki [121] ont rapporté que la résistance à la compression des mortiers comprenant jusqu'à 80% de laitier en substitution du ciment peut être améliorée en augmentant la finesse du laitier de 400 à 800 m²/kg.

L'augmentation de la finesse de l'addition de 400 à 800 m²/kg a conduit une amélioration de la résistance de 97,54 %, 36,8 % et 32,19 % à 7, 28 et 56 jours respectivement.

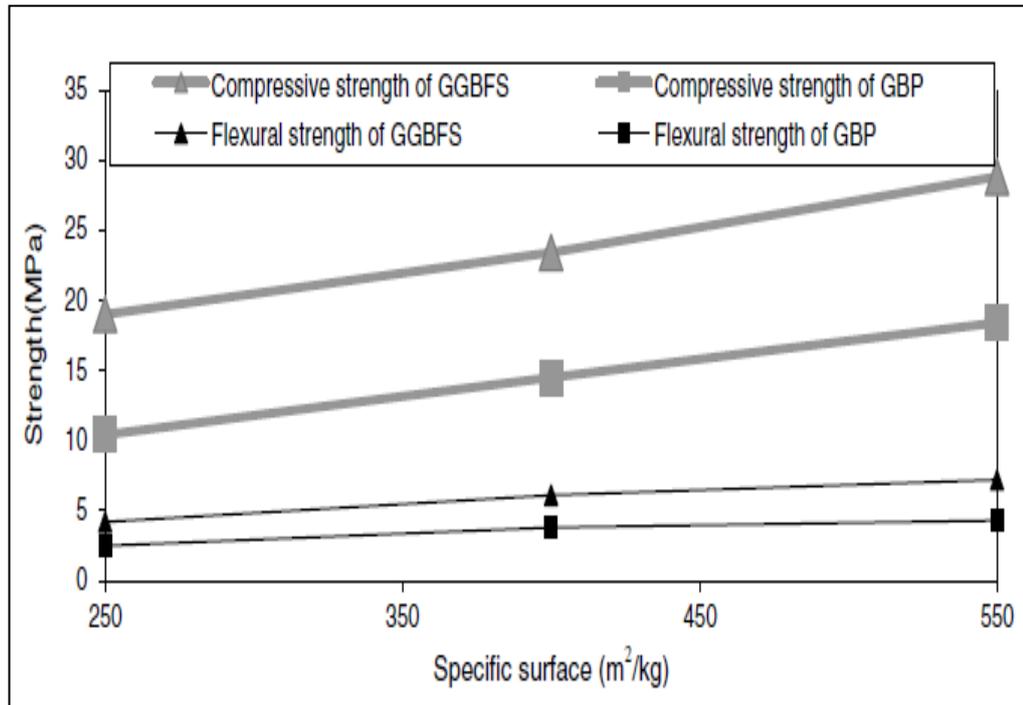


Figure 2.14 : Résistance en compression des pâtes de ciment en fonction de la finesse du laitier [120].

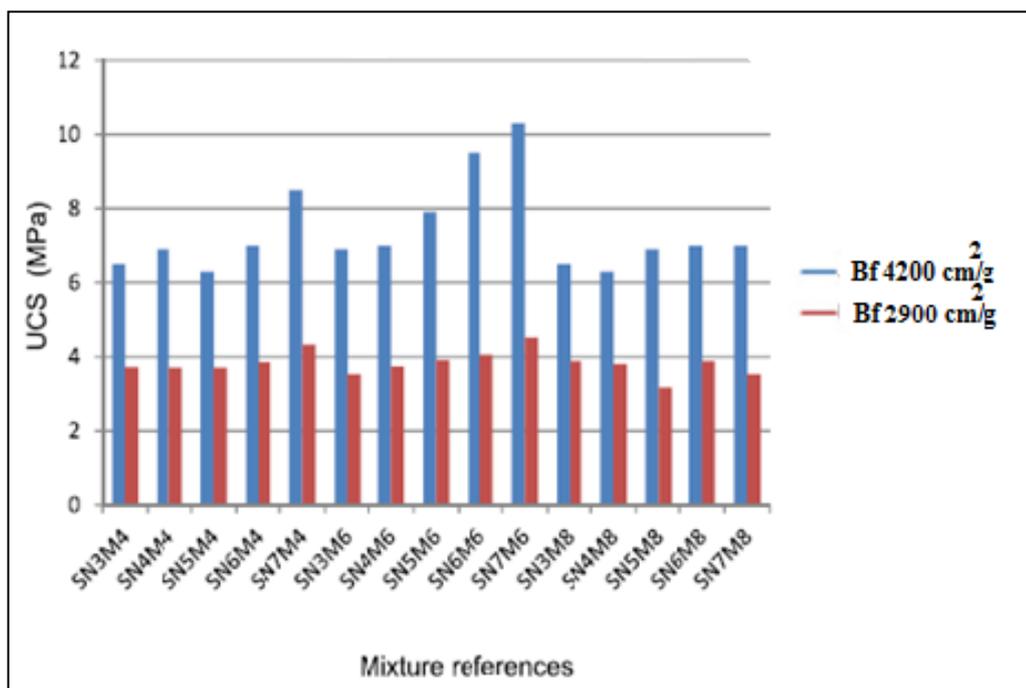


Figure 2.15 : Résistance en compression des pâtes de ciment à base de laitier [85].

2. 3.2. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction est l'une des propriétés fondamentales du béton. Elle peut être considérée comme un paramètre intéressant dans le calcul et la conception des dalles d'autoroutes et d'aérodromes, résistance au cisaillement et résistance à la fissuration. Une prédiction précise de la résistance à la traction du béton aidera à atténuer les problèmes de fissuration, améliorer la prévision de la résistance au cisaillement et minimiser la rupture du béton en traction.

La composition particulière des bétons et mortiers autoplaçants peut entraîner des variations de résistance à la traction. Ces variations peuvent être expliquées par la qualité de la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition liées à la nature ou bien à la finesse des fines. Les rapports entre la résistance à la traction et celle à la compression des BAP ou MAP peuvent différer de ceux des bétons ordinaires. Turcry [122] démontre que, pour une même résistance à la compression, le BAP et le BO ont une même résistance à la traction. D'après Pineaud [123], la résistance en traction des BAP est supérieure à celle des BV (de l'ordre de 10%). Les auteurs ont expliqué ce résultat par la qualité de l'interface pâte-granulats qui est considérée meilleure dans les BAP et par la faible proportion de granulats qui diminue le risque de propagation des premières fissures. Similaires résultats ont été affirmés par Felekoglu et al. [124]. De même, Klug et Holschemacher [93] ont montré que les mélanges de BAP présentent des résistances aux tractions élevées comparées à celles des bétons traditionnels. Une amélioration de résistance pouvant aller jusqu'à 40% a été notée.

Une étude de l'influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance mécanique des mortiers à base des ciments composés a été menée par Chaib et al. [38]. D'après les résultats illustrés sur la figure 2.16, il est évident que l'augmentation du taux d'addition a un effet négatif sur la résistance à la flexion quelque soit l'âge de conservation. Omrane et al. [100] ont également constaté une diminution des résistances à la traction des BAP avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane (5, 10 et 15%) à courtes et à longues échéances. Pour une substitution de 15%, une réduction de 1,86 MPa et de 2,21 MPa a été enregistrée à 28 et 90 jours respectivement (Figure 2.17). Des résultats similaires sont constatés dans les travaux de Deboucha et al. [97] où il a été conclu que l'incorporation de la pouzzolane naturelle dans les compositions de mortier entraîne une diminution de la résistance à la flexion. Cette réduction est beaucoup plus prononcée pour les mélanges contenant 30% et

40% de pouzzolane. Par contre Elbar et al. [125] ont remarqué que dans une cure standard ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$) et à 28 jours d'âge, les ciments contenant 10 et 20% de pouzzolane naturelle développent des résistances à la flexion comparables à celles données par un ciment Portland.

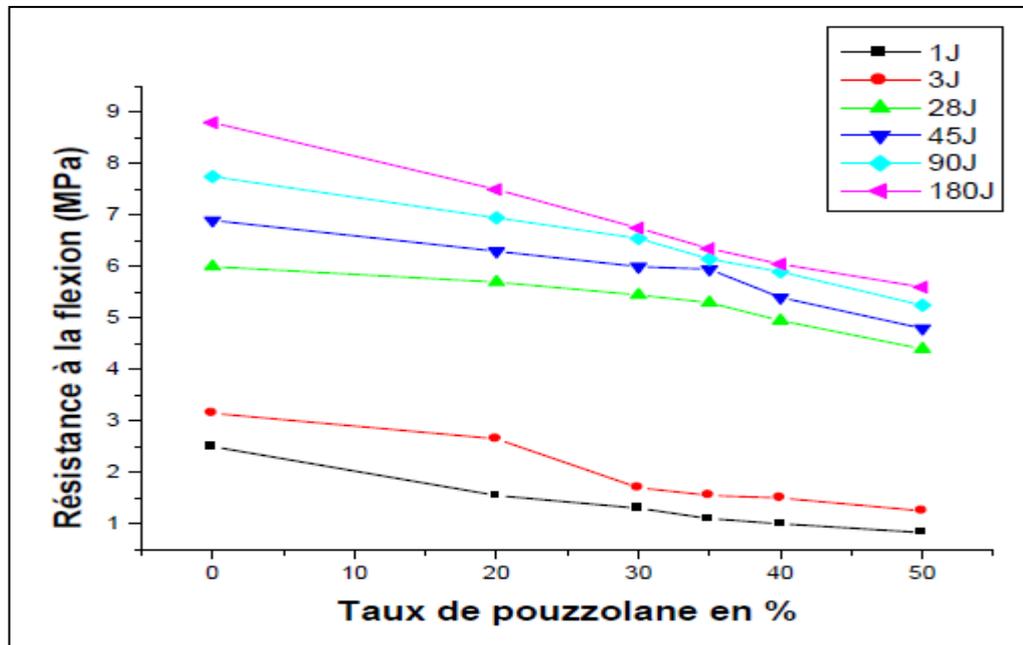
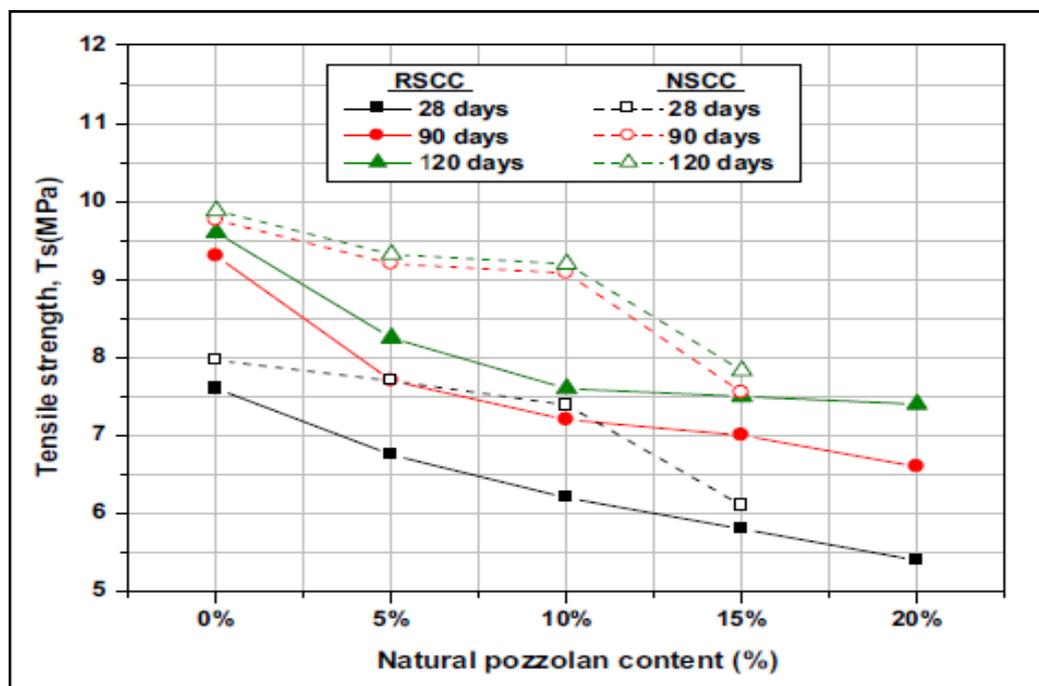


Figure 2.16: Evolution de la résistance à la flexion des mortiers binaires [38].



2.17: Influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la traction [100].

D'autre part, Chabi et al. [96] ont observé une diminution de la résistance à la traction des mortiers contenant de la pouzzolane et de laitier (30% de substitution). Cette diminution est beaucoup plus importante pour les compositions contenant 15% de pouzzolane et 15% de laitier (Figure 2.18). Ceci a été expliqué par la propriété latente de l'hydratation des ciments composés. Dans une étude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant, il a été constaté que l'augmentation du taux de substitution du ciment par le laitier conduit à une diminution de la résistance à la traction. Cette réduction est de l'ordre de 25% à 28 jours et pour une substitution de 25% de laitier. Il a été également remarqué que les résistances sont comparables à celle du béton témoin à long terme [126]. Pan et al. [70] ont montré que la résistance à la traction augmente légèrement avec l'introduction de 10% de laitier. Au-delà de cette valeur, il a été constaté que l'augmentation de la teneur de substitution de l'addition conduit à une réduction linéaire de la résistance comparé au béton de référence (Figure 2.19). Une diminution de l'ordre de 2,6 MPa, 2,3 MPa, 2,0 MPa et 1,8 MPa a été notée pour les bétons contenant 20%, 30%, 40% et 50% respectivement. Similaires observations ont été constatées par Zhao et al. [127], où une diminution de la résistance à la traction a été notée quelque soit la période de cure (Figure 2.20).

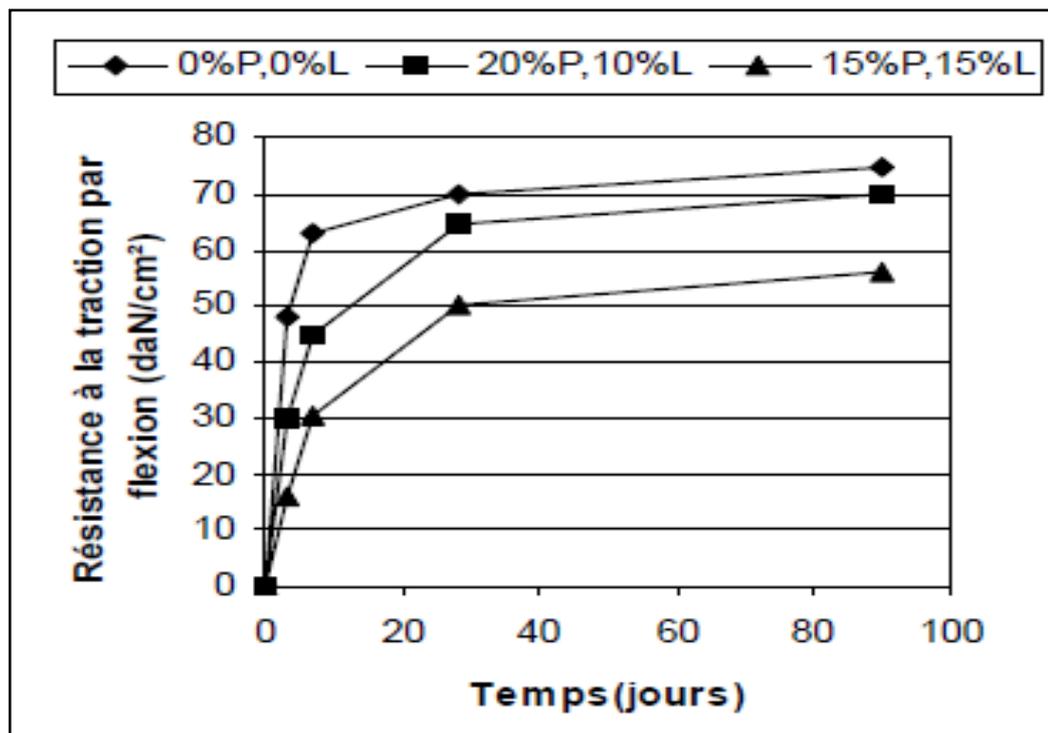


Figure 2.18: Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction de la teneur en pouzzolane et du laitier [96].

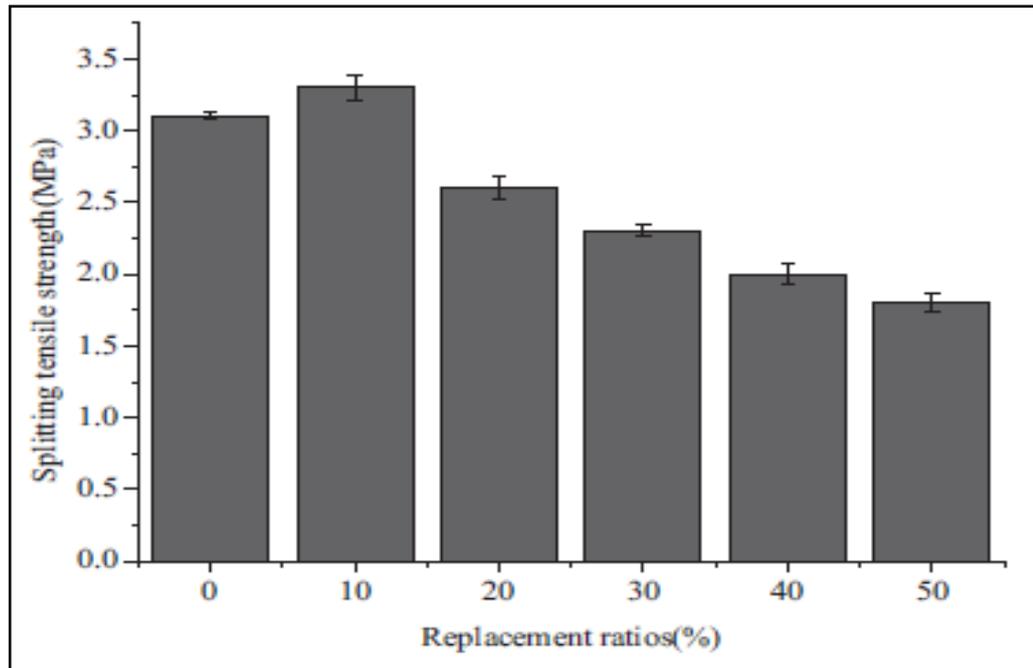


Figure 2.19: Résistance à la traction en fonction de la teneur en laitier [70].

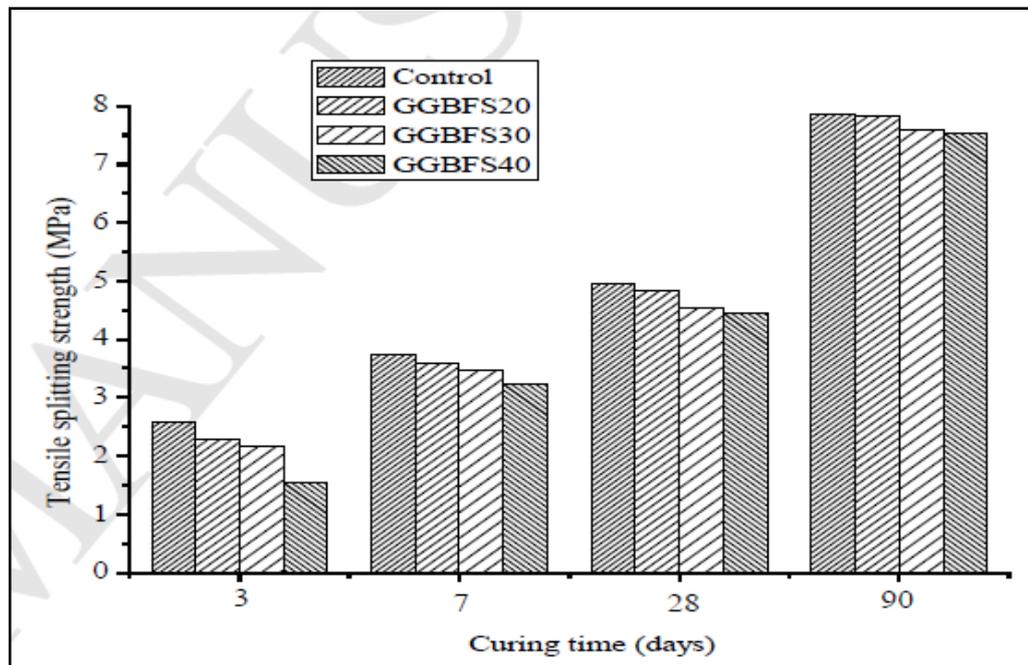


Figure 2.20: Développement de la résistance à la traction des BAP à base de laitier [127].

Cependant, d'autres travaux menés par Mohan et Mini [75] sur l'effet des additions minérales sur le développement des résistances mécaniques des BAP ont montré une augmentation significative de la résistance en traction à 28 jours d'âge avec l'incorporation des additions minérales dans les compositions de BAP.

Ce résultat a été expliqué par la nature de la pouzzolane qui entraîne une amélioration des caractéristiques de la pâte de ciment par la formation d'hydrates supplémentaires et la densification de la microstructure de la pâte de ciment hydratée [128]. Sivasundaram et Malhotra [129] ont étudié la variation de la résistance à la flexion des bétons avec des volumes élevés de laitier de 50% à 75%. Il a été conclu qu'à 14 jours, les bétons à base de laitier développent des résistances à la flexion supérieures à celle du béton témoin. Les auteurs ont noté une augmentation de l'ordre de 8 MPa. Khatib et Hibbert [130] ont étudié l'influence de laitier (0%, 40%, 60% et 80%) sur la résistance à la flexion du béton. Ils ont affirmé que la résistance à la flexion du béton contenant 60% de laitier, est nettement plus élevée que celle béton control. En étudiant la contribution du métakaolin aux propriétés mécaniques et de durabilité des BAP, Kannan [131] trouvait que l'incorporation de 15% de métakaolin dans les compositions de BAP conduit à une augmentation de la résistance à la traction. Ce résultat a été expliqué par la formation des C-S-H additionnels en présence du métakaolin conduisant ainsi au raffinement des pores et à la densification de la microstructure.

La surface spécifique des additions minérales peut influencer le taux d'hydratation. Les modifications des propriétés physico-chimiques dues à la variation de la finesse des additions minérales affectent directement les résistances mécaniques. En effet, en étudiant la contribution de la pouzzolane naturelle aux propriétés mécaniques et de durabilité des mortiers, Semcha [132] trouvait que l'augmentation de la surface spécifique de l'addition améliore considérablement Les résistances mécaniques des mortiers à base de pouzzolane.

Binici et al. [120] étudient l'effet de la finesse des ajouts minéraux sur les propriétés des pâtes de ciment et constatent que la résistance à la flexion augmente avec l'accroissement de la surface spécifique du laitier. Une augmentation de 4,2, 6,1 et 7,2 MPa a été notée à 28 jours pour des finesses de 250, 400 et 500 m²/kg respectivement. D'autres chercheurs [117] rapportent que l'augmentation de la finesse du laitier conduit à une meilleure réactivité de l'addition.

2.4. Influence des additions minérales sur le retrait des BAP et MAP

Le retrait du béton est défini comme une déformation volumique du matériau au cours de son durcissement, induite par des phénomènes physico-chimiques liés à l'hydratation de la

pâte de ciment et au séchage. L'importance du retrait dans les structures en béton armé est essentiellement rattachée à la fissuration. La contraction ou l'accourcissement d'une pièce provoque des tensions internes qui tendent à s'opposer au changement de dimension. Cette opposition à la variation de dimension est due à des obstacles internes tels que les agrégats et les armatures. Les contraintes de traction qui résultent de ces obstacles et de ces gradients de déformation peuvent atteindre la résistance du béton à la traction et donc causer la fissuration du matériau. Ces fissures, chemins privilégiés de pénétration des agents agressifs, non seulement diminuent la capacité d'une structure à supporter la charge admissible, mais elles peuvent aussi affecter sa durabilité et nuire à sa bonne apparence. Cette variation dimensionnelle dépend de plusieurs paramètres tels que la composition du béton et les conditions extérieures de conservation. Le retrait du béton possède différentes origines d'où on peut distinguer les différents retraits qui caractérisent le séchage du béton:

2.4.1. Retrait de dessiccation (séchage)

Le retrait de dessiccation est considéré comme un indicateur important de durabilité contrôlant la détérioration du béton. Appelé aussi retrait de séchage ; Il est lié au départ de l'eau du béton par évaporation en présence d'un gradient hydrique entre le béton et l'air ambiant (conditions normales). Son intensité dépend de la réserve d'eau disponible dans le matériau après les réactions d'hydratation, et donc directement du rapport E/C et de l'hygrométrie ambiante. Le mécanisme du retrait de dessiccation est résumé sur la figure 2.21.

- Dès que l'humidité est inférieure à 100 %, c'est l'eau libre dans les grands pores capillaires qui commence à s'échapper. Cette perte d'eau provoque relativement peu de retrait.
- Pour des taux d'humidité compris entre 50% et 90%, C'est l'eau non-libre qui s'évapore. Cette évaporation provoque un retrait important (Zone B).
- Lorsque le taux d'humidité devient inférieur à 50%, l'eau adsorbée dans les petits capillaires commence à s'évaporer. Ce processus produit des tensions capillaires qui compriment les parois des pores et provoquent une diminution de volume de la pâte.

- Pour un taux d'humidité inférieur à 30%, l'eau zéolithique devient instable et commence à s'évaporer. L'eau zéolithique est responsable des pressions de disjonction qui écartent les feuillettes de C-S-H. Si cette eau disparaît le système se contracte et le volume diminue (retrait).

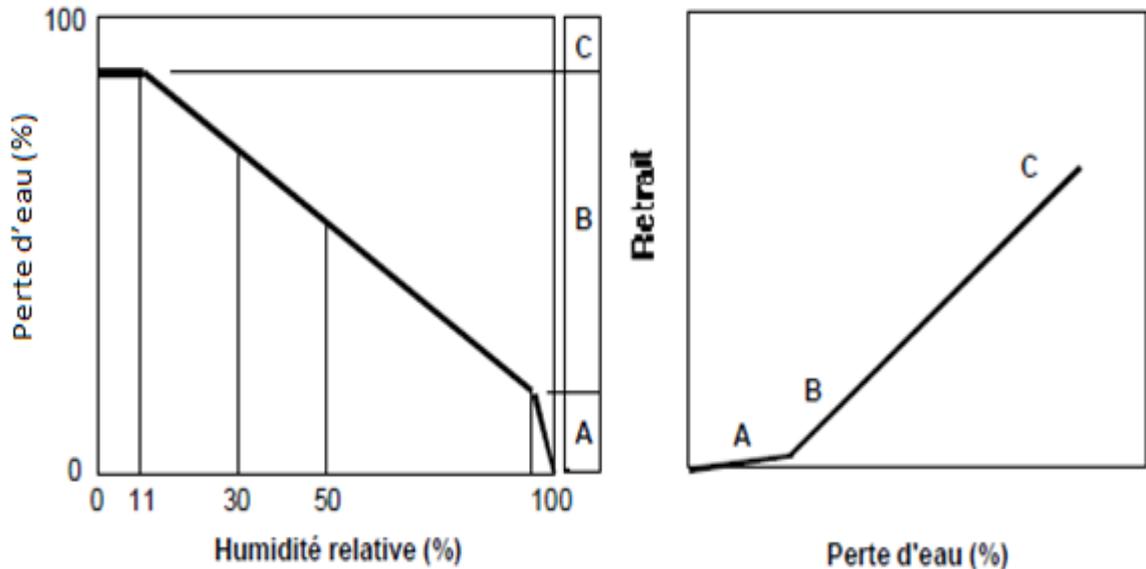


Figure 2.21: Relation entre la perte d'eau, l'humidité relative et le retrait de séchage de la pâte de ciment hydraté [133].

Le retrait de séchage est d'autant plus important que le rapport E/C est grand. Il augmente aussi avec le volume de pâte [122]. Leemann et al. [134] ont constaté que le retrait des BAP est plus élevé comparé au béton témoin. Leur résultat a été expliqué par le volume de pâte qui est important dans le cas des BAP. Des observations similaires sont constatées dans les travaux de Valcuende et al. [135], où les auteurs ont affirmé que le retrait de dessiccation des BAP est plus important que celui du béton de référence. Ce phénomène a été expliqué par le fait que les BAP (à base de calcaire) se caractérisent par une structure poreuse plus fine et un volume important de pore conduisant ainsi à des forces capillaires plus importantes.

Abdelhmid et al. [136] ajoutent qu'à long terme, les BAP développent un retrait de dessiccation supérieure à celui des bétons ordinaires confectionnés avec le même rapport E/L. Une augmentation d'environ 10 à 15% a été notée quelque soit l'échéance de mesure.

Plusieurs recherches ont été conduites afin d'étudier l'influence des additions minérales sur l'évolution des déformations du retrait. En effet, Itim et al. [137] constatent que les mortiers à la pouzzolane naturelle (10%, 20% et 30%) sont caractérisés par une nette réduction du retrait. Cette réduction est d'autant plus marquante après la première semaine où la pouzzolanité commence à prendre effet. Cette réduction est due à la qualité de la microstructure et à l'affinement des pores qui empêchent l'évaporation de l'eau. A long terme, le retrait de dessiccation est comparable quelque soit le taux de substitution du ciment. Adekunle et al. [101] ont montré, en étudiant les propriétés des BAP contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets industriels comme additions minérales que tous les mélanges ternaires contenant 10% et 15% de pouzzolane naturelle présentent une faible déformation de retrait de dessiccation allant de l'ordre de 230 à 270 microns à 28 jours. A long terme, le retrait se stabilise et présente des valeurs comprises entre 280 à 330 microns (Figure 2.22).

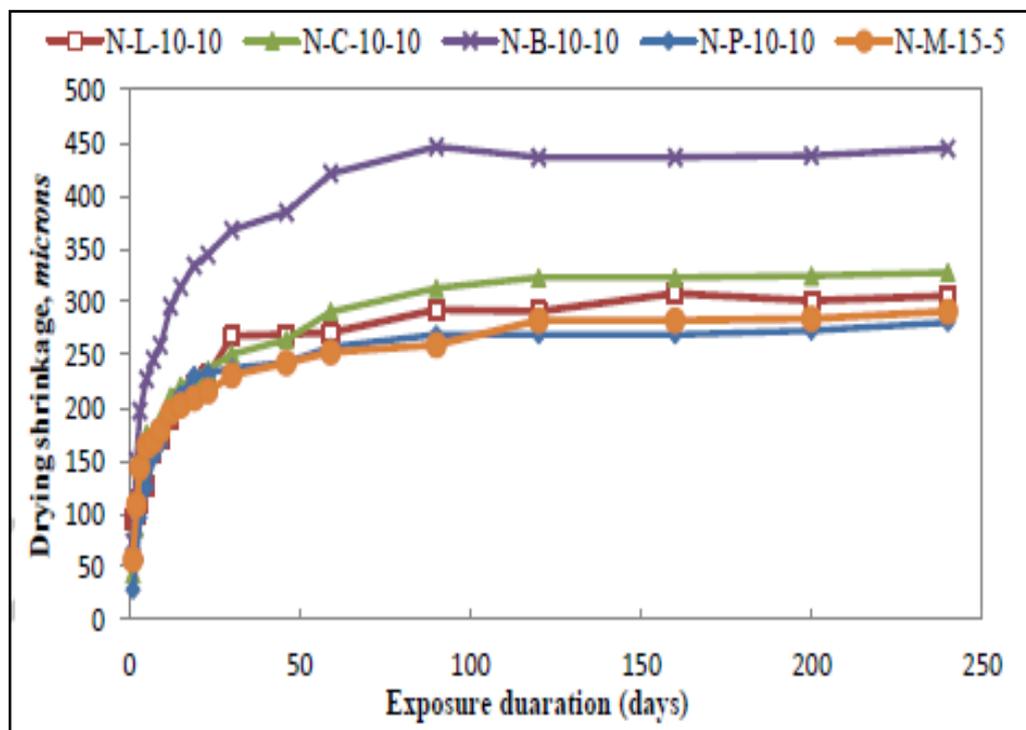


Figure 2.22: Evolution du retrait de séchage des BAP [101]

Sur une étude de l'effet des additions minérales sur les propriétés des BAP, Zhao et al. [127] ont conclu que la variation du retrait à jeune âge n'est pas significative avec la quantité du laitier incorporée. Cependant, les auteurs ont remarqué qu'à 56 jours,

l'augmentation du taux de substitution du ciment par le laitier conduit à une diminution du retrait de séchage des BAP. En effet, les mélanges contenant 20%, 30% et 40% de laitier présentent un retrait de l'ordre de 0,0441 %, 0,0416 % et 0,0394 % respectivement (Figure 2.23). Cela a été expliqué par la diminution du taux d'hydratation des bétons au laitier [138]. El-Chabib et Syed [139] ont étudié le retrait du BAP contenant un volume élevé de laitier. Leurs résultats ont montré que la substitution du ciment par 70% de laitier conduit à une réduction du retrait d'environ 45% comparé au béton de référence. Min et al. [140] ont également noté que les bétons contenant 50% de laitier présentent un retrait inférieur à celui du béton témoin. D'autre part, Alaa et al. [58] estiment que l'introduction d'un volume important de laitier dans les compositions cimentaires est bénéfique sur la durabilité des bétons. En effet il est connu que le retrait peut provoquer des fissures importantes particulièrement pour les ouvrages en grandes masses. Les auteurs jugent que l'utilisation d'un grand volume de cette addition peut atténuer le problème de fissuration des mortiers et bétons. Leurs résultats affirment qu'à jeune âge, l'incorporation d'un volume élevé de laitier (85% et 90%) dans les compositions de mortier ou béton réduit le retrait de séchage de ces derniers (Figure 2.24). Des observations similaires sont constatées dans les travaux de Tadi et Rao [141] où il a été conclu que la présence du laitier réduit le retrait de dessiccation des BAP (Figure 2.25).

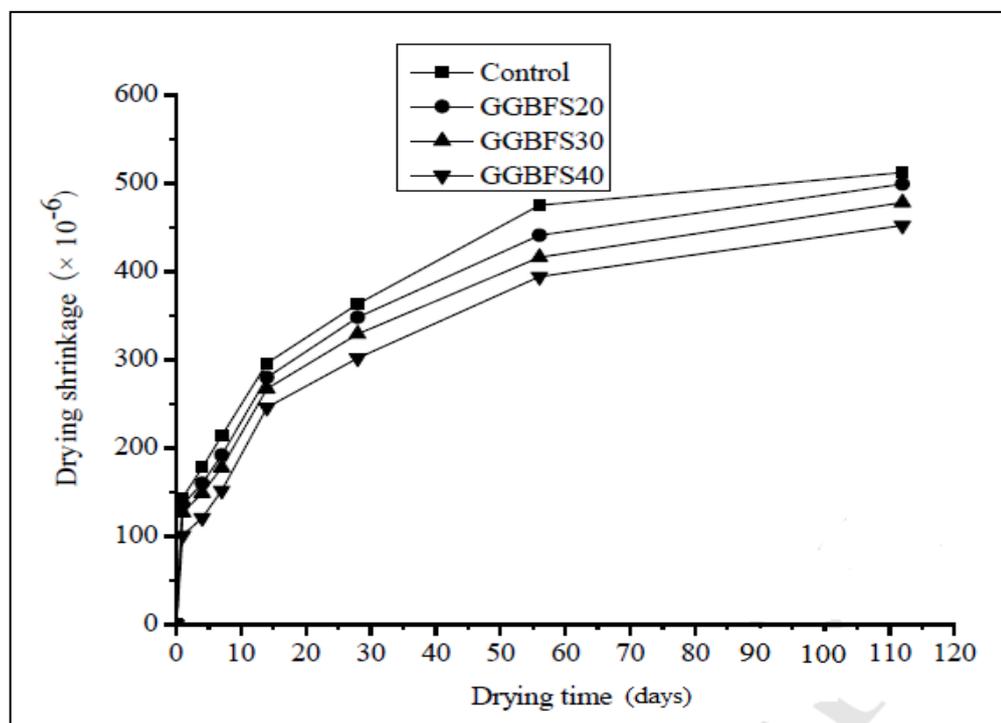


Figure 2.23: Influence du laitier sur le retrait de séchage des BAP [127]

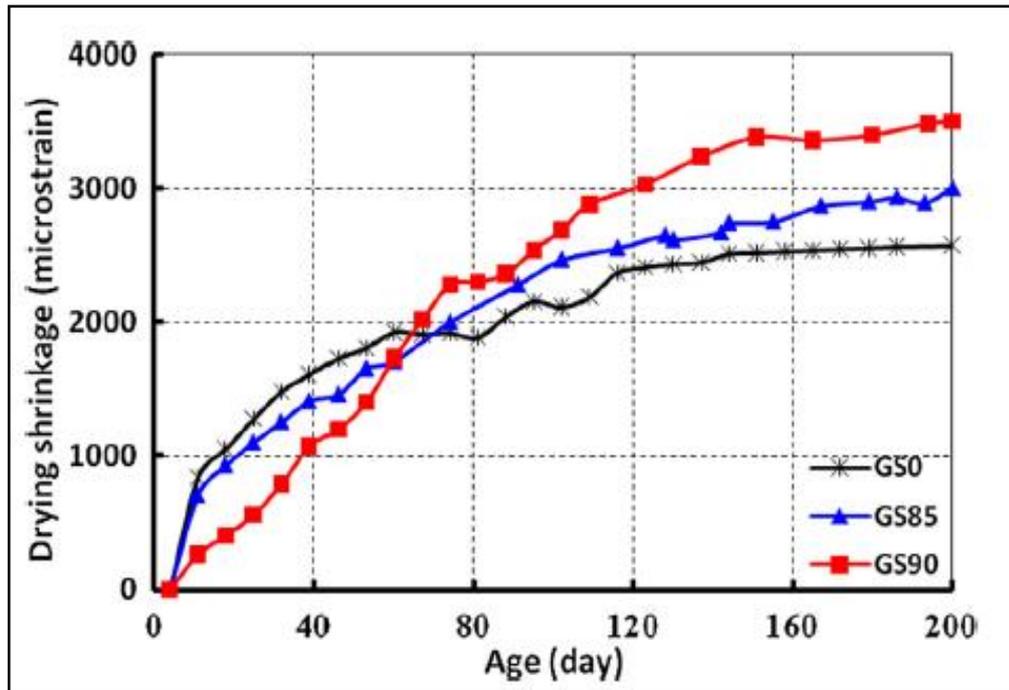


Figure 2.24: Influence du laitier sur le retrait de séchage des BAP [58].

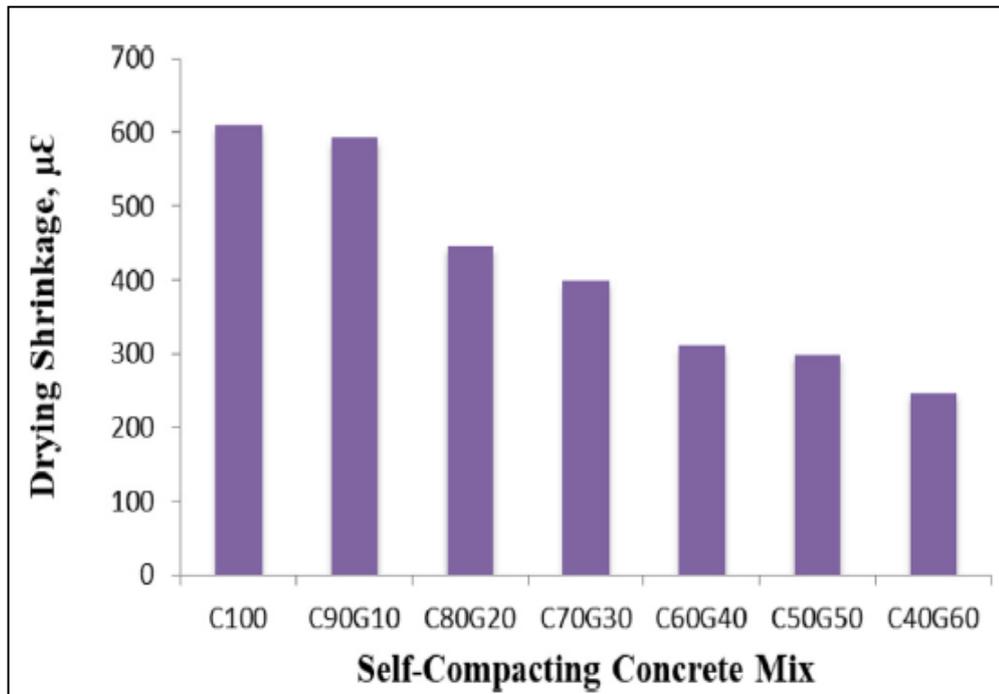


Figure 2.25: Retrait de dessiccation des BAP au laitier [141].

D'autres travaux [142] mentionnent qu'en présence de 15% de laitier, le retrait de séchage est inférieur à celui du béton sans addition (Figure 2.26). Une réduction de 37,5% a été enregistrée pour les mélanges contenant 15% de laitier et 5% de métakaolin.

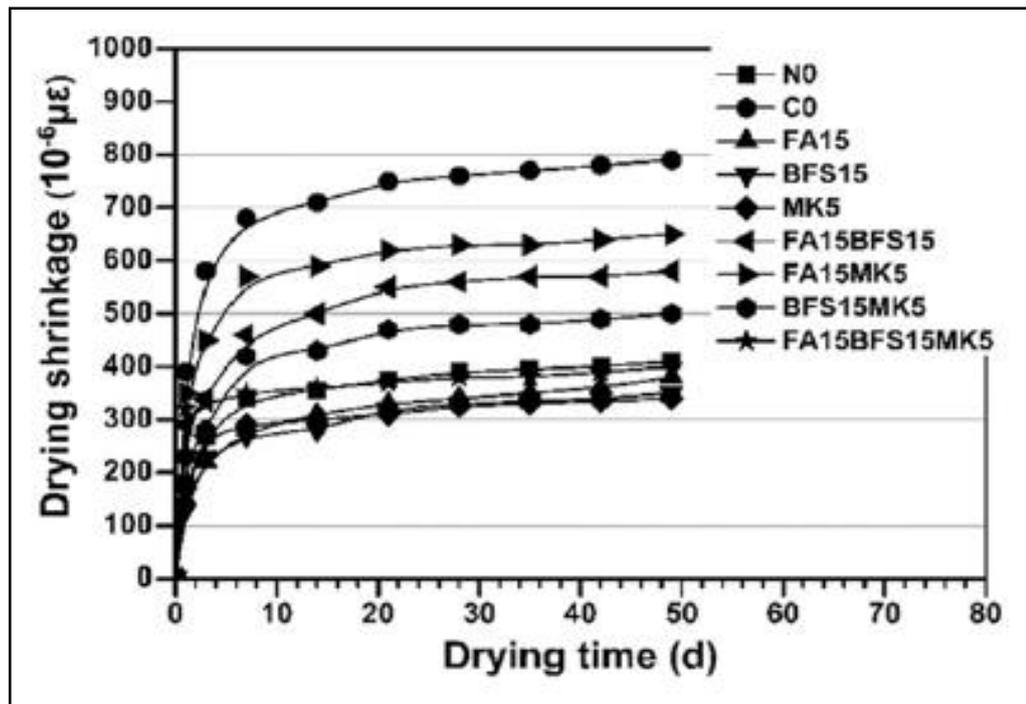


Figure 2.26: Influence des additions minérales sur le retrait de dessiccation des BAP [142].

Alors que Sivasundaram et Malhotra [143] ont observé que le retrait de dessiccation des bétons contenant 50% et 70% de laitier est comparable à celui du béton témoin.

Une étude expérimentale fut réalisée par Abdalhmied et al. [136] où des cendres volantes ont été incorporées dans les mélanges de bétons à des teneurs de 0-60%. Les résultats illustrés sur la figure 2.27 montrent que le retrait de séchage des BAP diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur de substitution du ciment par l'addition. Kristiawan et Aditya [144] étudient les conséquences de l'addition d'un grand volume de cendres volantes sur le retrait de séchage des BAP. Ils constatent que l'augmentation de la teneur des cendres volantes est bénéfique sur le retrait de dessiccation. En effet, ils trouvent un retrait minimum pour une substitution de 65%. Similaires observations ont été également révélées par Pongsakon et al. [145]. Une diminution de retrait de dessiccation d'environ 33% a été observée avec l'introduction des cendres volantes. Ce phénomène a été expliqué par la densification de la microstructure générée par la finesse importante des cendres volantes. Dans le même contexte, Herrera et al. [146] ont conclu qu'à 28 jours, le remplacement du ciment Portland par des cendres volantes réduit le retrait de séchage entre 17% and 45%. Cette réduction devient plus significative avec l'accroissement du taux de substitution.

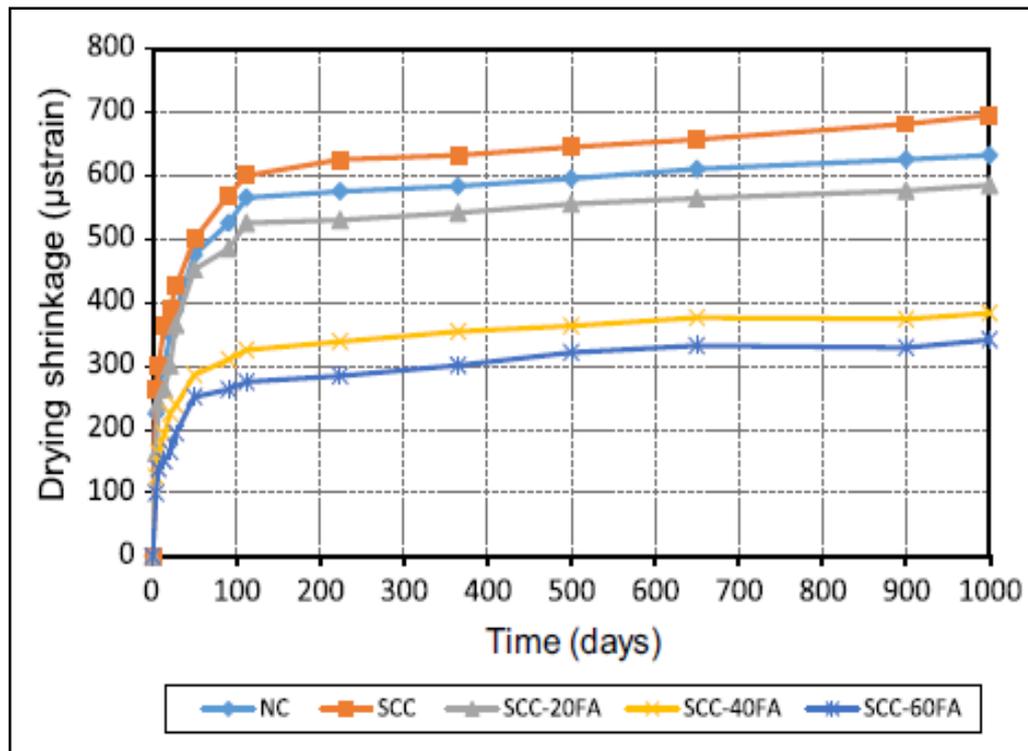


Figure 2.27: Influence des cendres volantes sur le retrait de séchage des BAP [136].

D'après Choudhary et al. [147], l'incorporation de la fumée de silice dans les compositions de BAP conduit à des valeurs de retrait de dessiccation supérieures à celles obtenues pour un béton sans addition. A 180 jours, une augmentation de l'ordre de 8,33% a été notée. Esquinas et al. [148] ont expliqué ce résultat par l'accélération de l'action pouzzolanique causée par la finesse élevée de la fumée de silice.

Güneyisi et al. [149] ont étudié l'évolution du retrait de dessiccation des bétons autoplaçants à base de pâtes de ciment binaires, ternaires et quaternaires. Les auteurs ont constaté que la substitution d'un ciment Portland par les cendres volantes, le laitier ou le métakaolin engendre une diminution remarquable du retrait de dessiccation pour un rapport E/L de 0,32. Tandis que la substitution du ciment par les fumées de silice (compositions binaires) conduit à une augmentation du retrait en comparaison avec le béton de référence.

2.4.2. Retrait endogène

Le retrait endogène est un phénomène physico-chimique couplé à des effets capillaires mécaniques dus à la consommation de l'eau des pores lors de l'hydratation. Les

déformations endogènes d'une pâte de ciment ou d'un béton sont définies comme les déformations qui ont lieu en condition isotherme lorsque le matériau est isolé de tout échange hydrique avec le milieu extérieur, c'est-à-dire dans des conditions scellées. Ces déformations sont une conséquence directe de l'hydratation du ciment. Ce retrait est rapide et croît lorsque la quantité d'eau diminue, il s'achève (95 %) au bout de (1 à 4) semaines [150]. On distingue d'après l'évolution de la structure du matériau l'apparition de plusieurs phénomènes qui donnent au retrait endogène plusieurs formes de déformation.

Le bilan volumique de la réaction d'hydratation se traduit par une diminution du volume absolu, le volume absolu des hydrates (V_h) formés étant inférieur à la somme des volumes absolus initiaux du ciment anhydre (V_a) et de l'eau consommée (V_e). La diminution du volume absolu est nommée "retrait chimique" ou "contraction de Le Chatelier". La variation de volume est présentée sur la figure 2.28.

La diminution du volume n'est plus libre à l'échelle de la microstructure dès le début de la prise, elle est gênée par le squelette minéral naissant. Le retrait est donc empêché. La poursuite de l'hydratation dans le matériau une fois rigidifié a pour conséquence directe le remplissage de la porosité de la pâte par les hydrates et la diminution de la teneur en eau dans les pores. Un volume gazeux apparaît alors dans la porosité de la pâte initialement saturée en eau. La création de ces vides fait apparaître des interfaces liquide-gaz (appelées ménisques) dans les pores, ce qui provoque la mise en traction de l'eau et la mise en compression du squelette solide. Il en résulte alors une diminution de son taux d'humidité interne. Ce phénomène, conséquence directe de la contraction Le Chatelier, est appelé auto-dessiccation. D'après Bouasker et al. [151], les effets capillaires sont considérés comme négligeables, pendant les premières heures de l'hydratation (depuis le contact eau-ciment jusqu'au début de prise). Durant cette période, le matériau est encore plastique et la variation volumique est intégralement compensée par une compression de la pâte dans la phase solide. Au cours de cette phase, le retrait endogène correspond majoritairement à du retrait chimique. La pâte acquiert ensuite une certaine rigidité qui gêne progressivement toute déformation volumique induite par l'hydratation. A ce stade, le retrait d'auto-dessiccation n'évolue que très lentement alors que le retrait chimique continue de croître.

Les matériaux cimentaires peuvent être très sujets à la fissuration à jeune âge à cause des valeurs élevées de déformations endogènes [152]. L'augmentation du retrait chimique est fortement liée au rapport Eau/Liant.

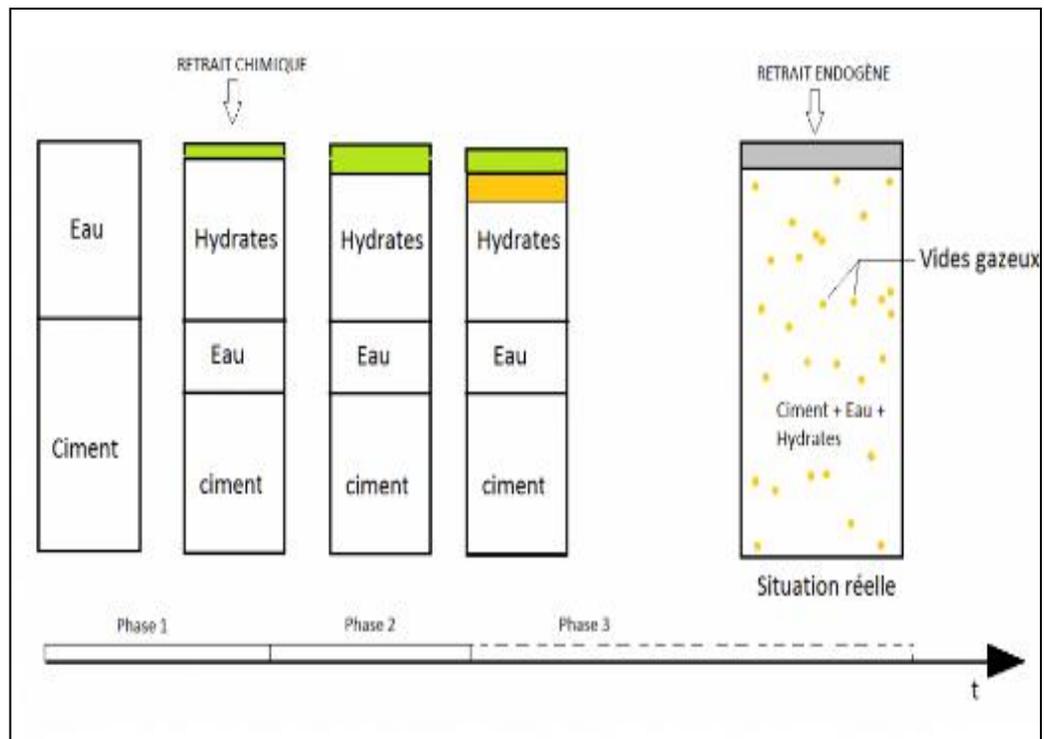


Figure 2.28: Présentation de la variation volumique [151].

Cependant, l'utilisation des additions minérales dans les compositions de béton ou mortier peut avoir un effet considérable sur la variation du retrait endogène. En effet, la présence d'ajouts minéraux peut générer une modification du réseau capillaire conduisant ainsi à une modification de l'ampleur du retrait d'auto-dessiccation. Des résultats de recherches [135] ont montré que le retrait endogène des BAP est plus faible que celui des bétons ordinaires (Figure 2.29). Long et Khayat [154] ont évalué le retrait endogène des BAP. Leurs résultats ont montré qu'à 56 jours, les BAP présentent un retrait endogène similaire à celui d'un béton traditionnel.

L'addition des ajouts minéraux au ciment Portland peut produire des modifications au niveau des déformations endogène [155]. L'évolution du retrait endogène des mortiers à la pouzzolane naturelle a été étudiée par Itim et al. [137]. Les auteurs ont constaté une activité de la pouzzolane au jeune âge qui a été justifiée par une importante consommation d'eau. En effet, Ezziane et al. [41] ont affirmé que des taux élevés de cette substance engendrent une accélération de la prise. A long terme, le retrait endogène des mortiers confectionnés à base de 20% et 30% de pouzzolane est réduit et devient nettement inférieur à celui du mortier témoin (Figure 2.30).

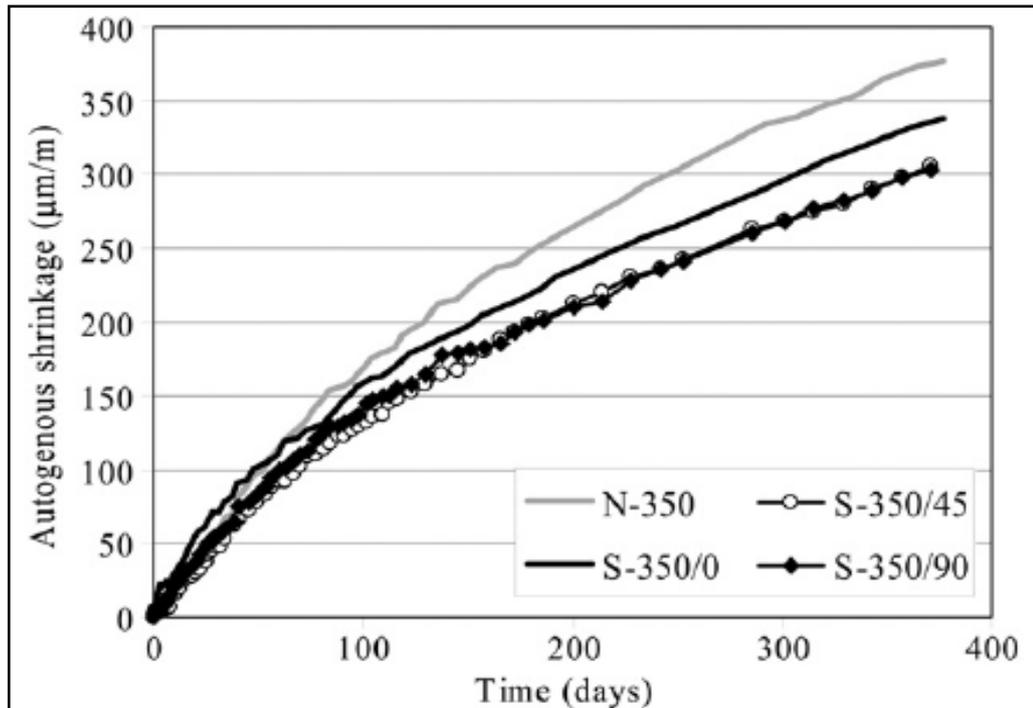


Figure 2.29: Retrait endogène des BAP et des BO [135].

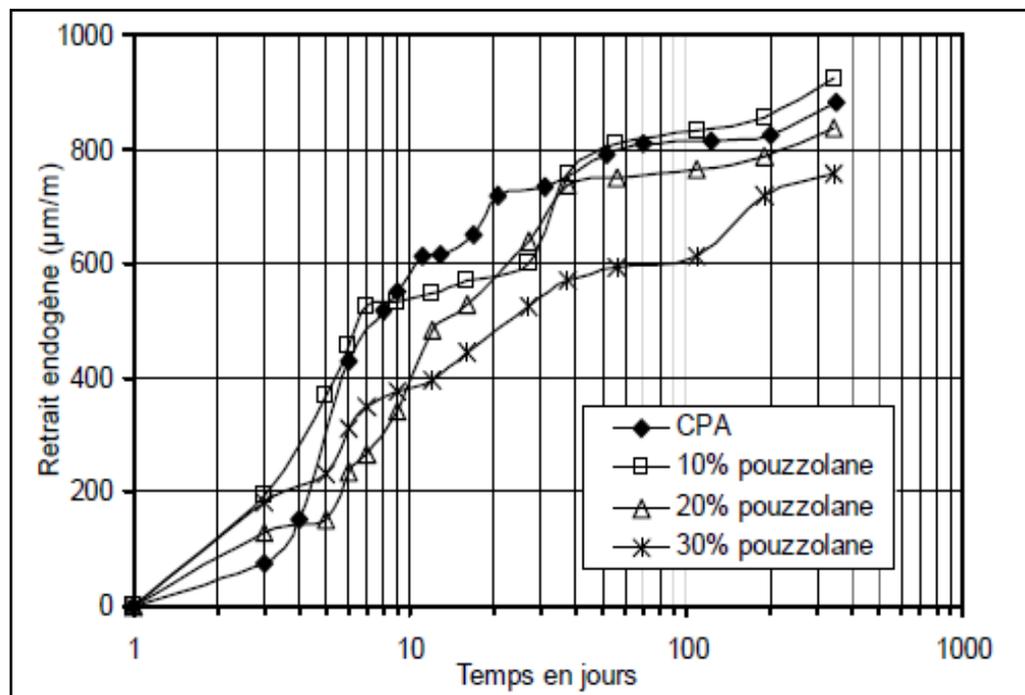


Figure 2.30: Évolution du retrait endogène des mortiers à la pouzzolane naturelle [137].

Ayed et al. [156] ont étudié l'influence des fines calcaires (FC) et de la pouzzolane naturelle (PN) sur les déformations dues au retrait endogène des BAP jusqu'à 400 jours d'âge. Les résultats présentés sur la figure 2.31 montrent qu'à 7 jours d'âge, la déformation

endogène des BAP FC et BAP PN présente un écart très important en faveur des BAP PN, environ de 35%. À 28 jours, l'écart entre BAP FC et BAP PN est presque nul. A long terme, le retrait endogène du BAP PN devient plus important par rapport au BAP FC. Le BAP PN à un retrait endogène plus grand de 32% par rapport au BAP FC.

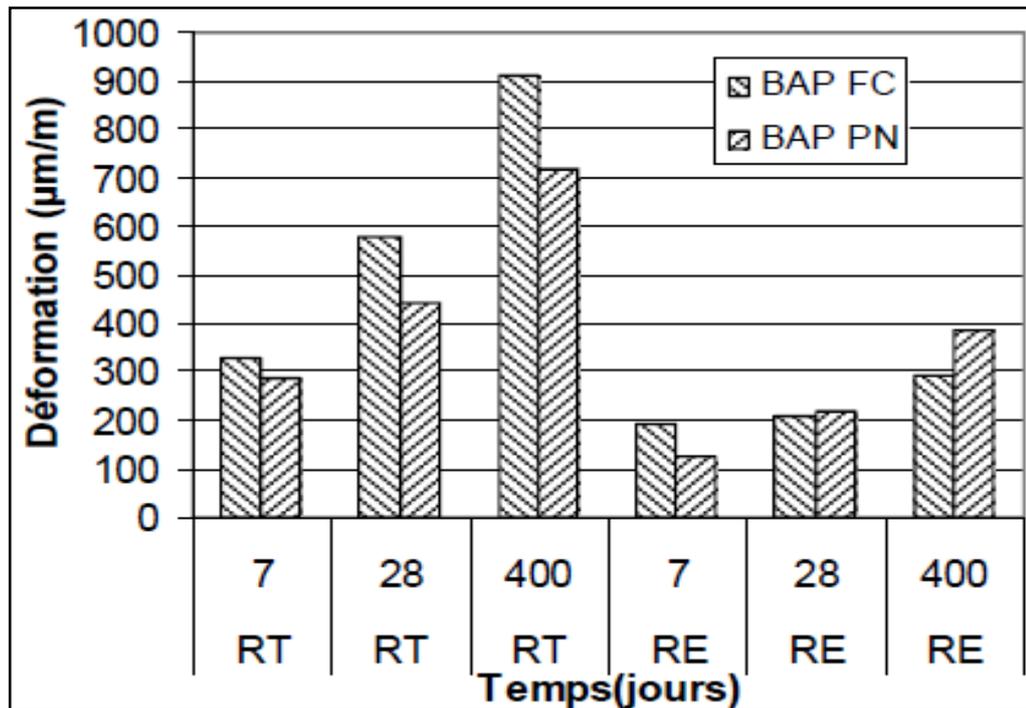


Figure 2.31: Évolution du retrait endogène des BAP aux additions minérales [156].

Le laitier ralentit la cinétique d'hydratation, densifie la microstructure cimentaire et affine la porosité capillaire. Et par conséquent la diminution de la taille des pores engendrerait une dépression capillaire plus intense et pourrait être à l'origine du retrait endogène plus important des bétons contenant des laitiers de haut fourneau [157]. Par ailleurs, D'autres recherches [158] ont confirmé qu'à longues échéances, le retrait endogène des pâtes à base de ciment au laitier est plus important comparé avec celui des pâtes au ciment Portland. Wei et al. [159] ont trouvé que la substitution de 50% de ciment par du laitier conduit à une baisse du retrait endogène à jeune âge tandis qu'il augmente à long terme. Mehdipour [160] a mené une étude sur les performances des BAP intégrant des matières minérales telles que le laitier, le métakaolin, les cendres volantes et les fumées de silice. L'auteur a prouvé que les BAP confectionnés à base d'additions minérales développent un retrait endogène inférieur à celui du béton sans ajouts. Il a été également constaté qu'à long terme, les mélanges contenant 50% de laitier développent un retrait endogène de l'ordre de

45 microns comparé au béton témoin où une valeur de 210 microns a été notée (Figure 2.32). Lee et al. [161] ont montré que des teneurs plus élevées en laitier entraînent un retrait endogène plus important. Les auteurs ont expliqué ce phénomène par l'augmentation de la réactivité des laitiers conduisant ainsi à l'augmentation du retrait chimique. En conséquence un retrait endogène plus important des pâtes de ciment.

Hu et al. [162] ont montré, en étudiant l'évolution du retrait et de la chaleur d'hydratation des mortiers contenant des additions minérales, que l'influence des cendres volantes sur le retrait endogène est plus significative que celle du laitier. L'augmentation du taux de substitution des cendres volantes de 0% à 50% entraîne une baisse de retrait de l'ordre de 71% tandis que de 52,4% pour une substitution de 50% de laitier. Dans le même sens, Herrera et al. [146] montrent que l'utilisation des cendres volantes diminue significativement le retrait endogène entre 39% et 84% pour une substitution entre 30% et 60% respectivement (Figure 2.33).

Alrifai et al. [163] étudient les paramètres de formulation sur le retrait endogènes des BAP et constatent que ce dernier augmente avec la diminution du rapport E/C. Par ailleurs, il a été observé que l'ajout des fillers calcaire est bénéfique.

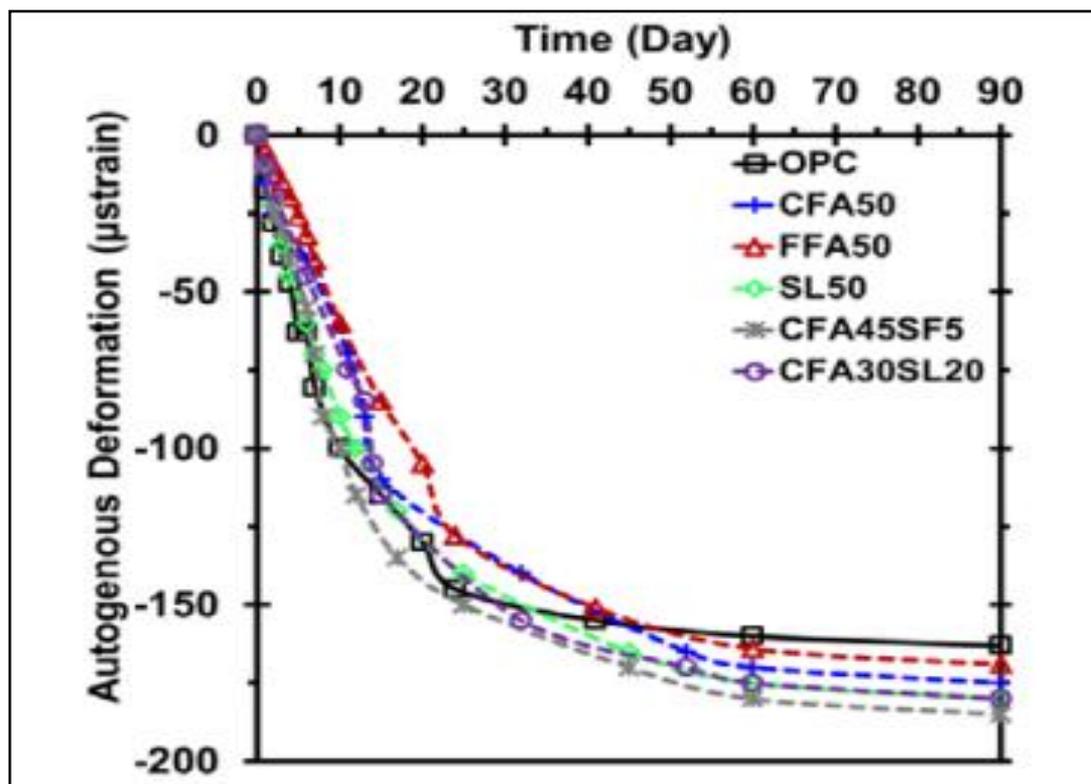


Figure 2.32: Influence des additions minérales sur le retrait endogène des BAP [160].

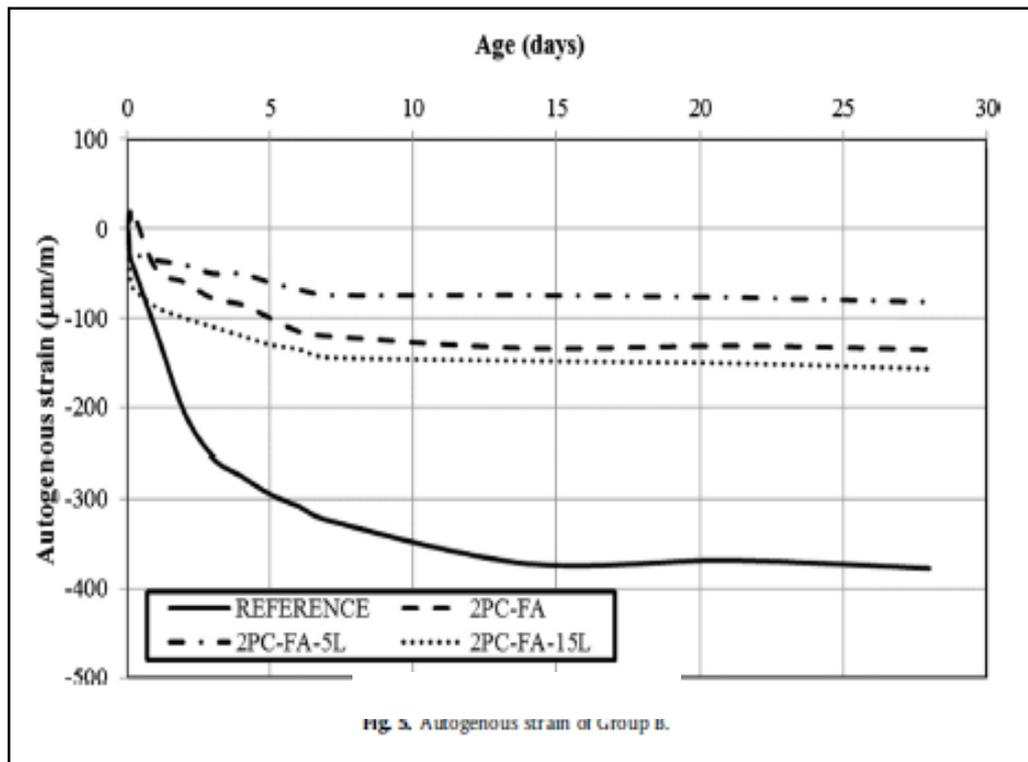


Figure 2.33: Retrait endogène des mortiers aux laitiers et aux cendres volantes [146].

En effet, le retrait endogène diminue avec l'augmentation de la teneur en calcaire dans les compositions de béton. Certains auteurs [164] considèrent que pour un même rapport E/L, la teneur des fines calcaires n'a pas d'influence sur le retrait endogène.

L'augmentation de la finesse des matériaux cimentaires utilisés dans les BAP conduit à un plus grand retrait endogène en raison de l'augmentation de la consommation interne d'eau lors de l'hydratation [165]. L'influence de la finesse du laitier sur le retrait endogène découle de la relation entre la surface spécifique et l'activité du laitier. En effet, une finesse plus élevée du laitier peut favoriser considérablement l'activité et accélérer l'hydratation de l'addition, qui améliore la structure des pores et abaisse l'humidité relative interne des échantillons au laitier. Les résultats de Tazawa [166] ont montré que l'incorporation de 75% de laitier d'une surface spécifique supérieure à $400 \text{ m}^2/\text{kg}$ peut causer l'augmentation du retrait endogène des bétons. Lee et al. [167] ont constaté que plus la réaction d'hydratation du laitier est importante générée par l'augmentation de la finesse de mouture de l'addition (surface spécifique de $430 \text{ m}^2/\text{kg}$), plus l'autodessiccation est importante conduisant ainsi à un retrait endogène supérieur. Les résultats expérimentaux de Tazawa et Miyazawa [168] ont également montré qu'avec l'augmentation de la substitution du laitier

jusqu'à 70 %, le retrait endogène des mélanges au laitier augmente progressivement lorsque la finesse de l'addition est de 400 m²/kg ou plus, alors que le retrait n'évolue pas lorsque le laitier est broyé à une finesse Blaine de 300 m²/kg.

Il existe plusieurs méthodes de mesure du retrait endogène dans la littérature à savoir : les mesures linéiques (verticales et horizontales) et les mesures volumiques.

- Mesures linéiques horizontales

Ces essais visent à mesurer les déformations longitudinales d'un échantillon coulé dans un moule prismatique horizontale. Le suivi de la déformation du matériau est assuré par l'utilisation des capteurs LVDT en contact avec des plots ancrés dans l'éprouvette (Figure 2.34). Les mesures de déformations commencent après la prise du matériau.

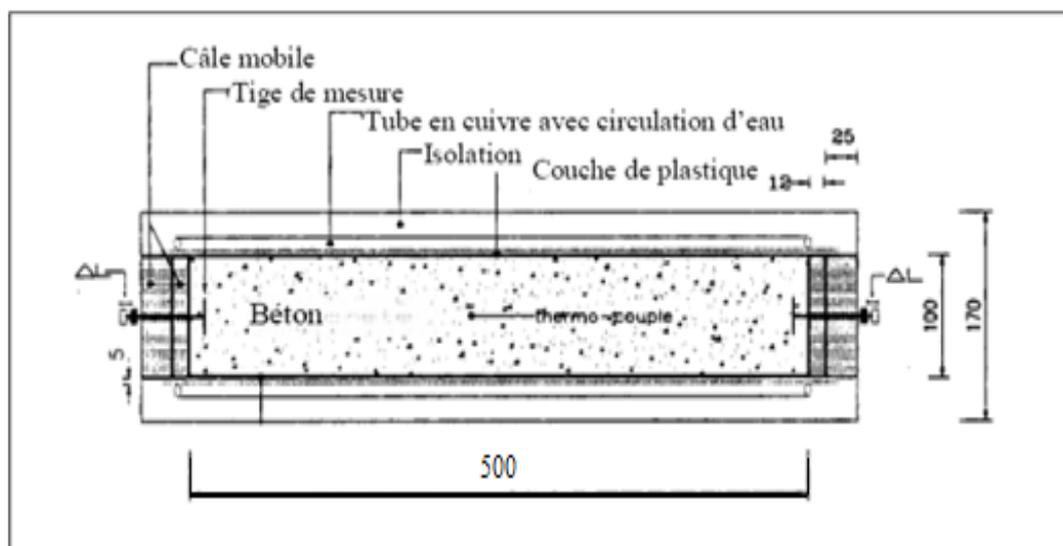


Figure 2.34 : Système de mesure horizontale [169].

Un autre dispositif appelé dilatomètre a été développé par Jensen et Hansen [170], dans le but d'éviter le problème de frottement entre le matériau et le moule. Ce dispositif est composé d'un moule flexible ondulé fixé à une extrémité et équipé d'un capteur de déplacement à l'autre extrémité (Figure 2.35). Les mesures de déformations se font dans un bain de glycol à une température de 20 C⁰. Afin d'éliminer les problèmes liés aux frottements, les capteurs de déplacement LVDT ont été remplacés par des capteurs laser

qui permettent de mesurer des déformations même au très jeune âge, dès la fin du coulage (Figure 2.36).

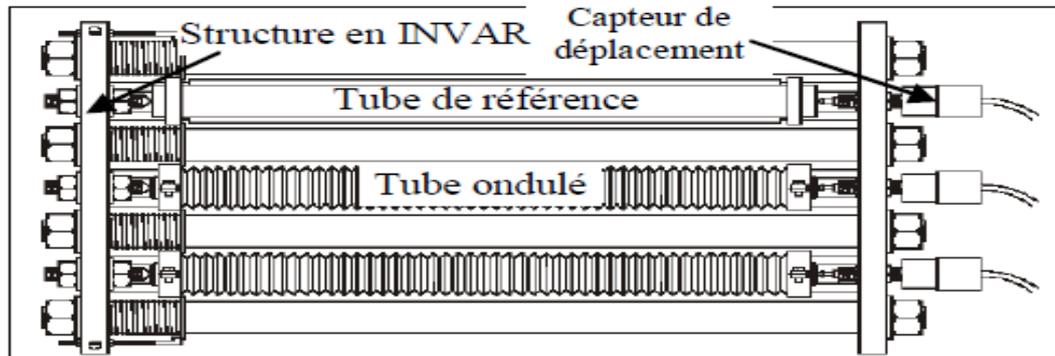


Figure 2.35 : Dilatomètre permettant de mesurer la déformation endogène [170].

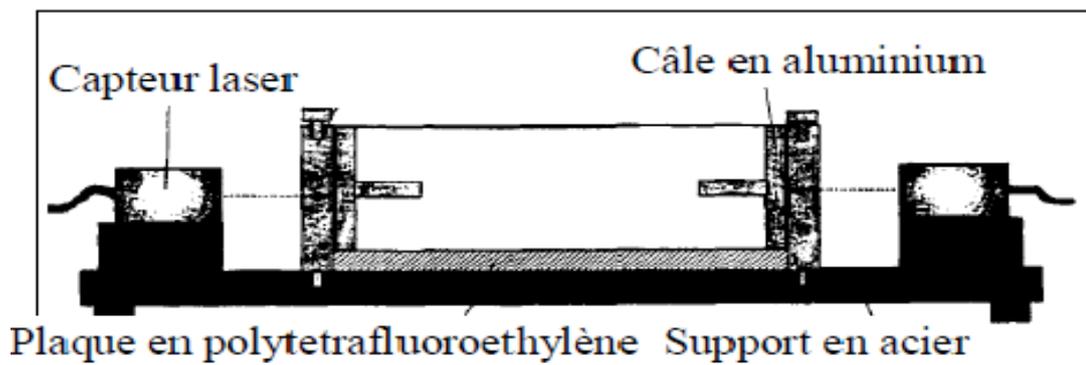


Figure 2.36 : Système de mesure avec des capteurs laser [171].

- Mesures linéiques verticales

Afin de mesurer les déformations verticales, Le Roy [172] a utilisé des moules en en téflon fermés à leurs extrémités par des « casques » en acier inoxydable. La mesure se fait verticalement à l'aide de deux capteurs LVDT positionnés dans les casques. Un autre dispositif de mesure de retrait endogène en vertical a été également utilisé par Staquet et al. [173]. Ce dispositif est composé de deux platines fixées aux deux extrémités de l'éprouvette (Figure 2.37), dont le déplacement relatif est mesuré par un capteur de déplacement. Le moule est constitué d'une enveloppe de caoutchouc en forme

« d'accordéon » permettant de suivre les déformations de l'éprouvette dès le très jeune âge. L'ensemble est immergé dans un bain d'eau thermostatée.



Figure 2.37 : Dispositif de mesure avec le système de Staquet [173].

- Mesures volumiques

La technique de mesure du retrait par méthodes volumiques est divisée en deux catégories : la mesure par suivi de niveau du liquide d'immersion et la mesure de la variation de volume par pesée hydrostatique. Le principe de la première méthode est d'isoler un volume de pâte de ciment dans une membrane, puis d'immerger l'ensemble dans un liquide (eau, mercure, huile de paraffine...). La déformation est déterminée par le suivi du niveau du liquide au cours de l'hydratation. Tandis que la deuxième méthode consiste à introduire un échantillon de pâte de ciment ou de mortier dans une membrane étanche en latex ; le dispositif est ensuite immergé dans un bain thermostaté, et relié à une balance par un fil. La variation volumique est représentée par une variation de la poussée d'Archimède enregistrée par la balance. Par exemple si le matériau se rétracte, la poussée d'Archimède diminue et la balance enregistre une augmentation de masse apparente de l'échantillon.

2.4.3. Retrait plastique

Le retrait plastique, appelé aussi retrait avant prise, est une déformation qui se manifeste tant que le béton est plastique, à un moment où la pâte est encore déformable. Donc avant et/ou pendant la prise et sous l'effet d'une dessiccation ou d'une autodesiccation; Une fissuration à la surface externe de l'ouvrage peu après le placement ou durant la finition peut se former. L'importance du retrait plastique est influencée par la vitesse de dessèchement qui dépend à son tour de la température de l'air et du béton ainsi que de l'humidité relative. Les fissures apparaissent dans le béton lorsque le retrait empêché dépasse sa capacité de déformation (Figure 2.38). Une grande partie des bétons autoplaçants est destinée aux applications horizontales comme les dalles, d'où un faible rapport volume sur surface et donc un retrait plastique élevé. Le mécanisme de retrait plastique peut s'expliquer comme suit :

Sous l'effet de la pesanteur, les composants les plus lourds du béton se tassent dans la pâte du ciment, poussant l'eau vers le haut. Un film d'eau se forme à la surface, appelé eau de ressuage (Figure 2.39). Par ailleurs, le volume des produits (les hydrates) formés lors de l'hydratation du ciment est inférieur à celui des réactifs (ciment, eau). Il se produit donc une diminution de volume, appelée retrait chimique ou contraction de Le Chatelier [174]. Une troisième composante s'ajoute à la diminution de volume : une évaporation trop rapide de l'eau en surface qui ne peut pas être compensée par celle qui monte durant le processus naturel de ressuage [175].

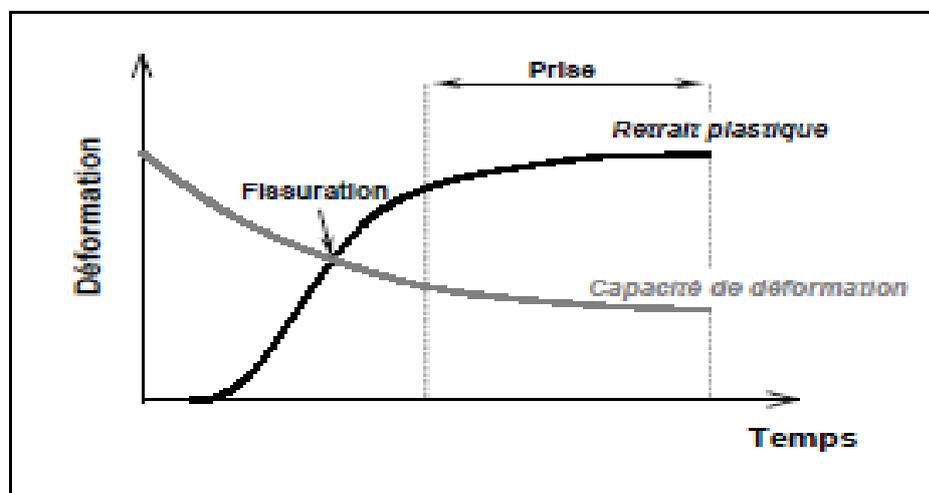


Figure 2.38: Fissuration à l'état frais, en termes de retrait et capacité de déformation [122].

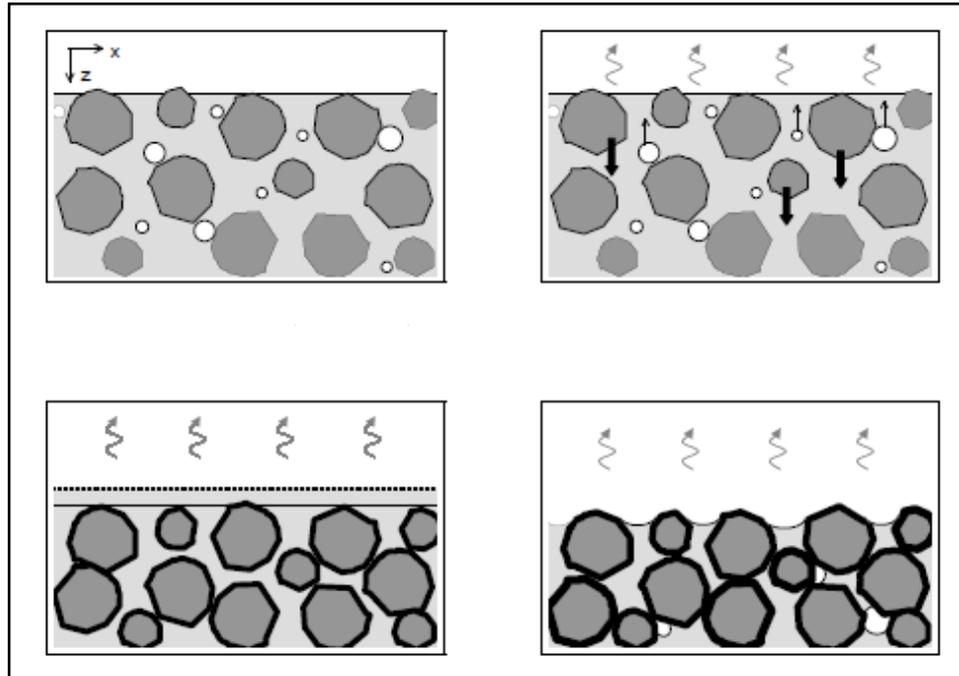


Figure 2.39: Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment [122].

L'évaporation progressive de l'eau de ressuage, fonction des conditions environnementales, fait apparaître un système complexe de ménisques à la surface du béton. A l'intérieur d'un béton de faible rapport E/C, la consommation de l'eau par l'hydratation du ciment crée également des ménisques [176]. L'apparition d'un ménisque (interface liquide-gaz) provoque une dépression de l'eau des pores. En effet, la présence de capillaires partiellement remplis d'eau dans le mélange induit l'apparition du mécanisme de dépression capillaire. L'eau dans les pores est alors en traction et provoque un rapprochement des parois capillaires. Plus l'humidité relative est basse, plus la quantité des pores non saturés, où le ménisque peut exister, est faible.

Les bétons autoplaçants ont une composition qui les rend a priori plus sensibles à la fissuration de retrait plastique comparés aux bétons ordinaires. Des études [177] ont montré que l'amplitude maximale du retrait plastique des bétons autoplaçants est au moins cinq fois supérieure à celle des bétons conventionnels (Figure 2.40). Deux paramètres de composition peuvent expliquer cette différence : d'une part, les BAP présentent des rapports eau sur fines plus faibles ; d'autres parts, le fort dosage en superplastifiant des BAP retarde leur prise. Par conséquent, il est préférable d'utiliser une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant. Song et al. [177] ont

montré que le laitier remplit bien cette condition. D'autres travaux ont comparé le comportement du BAP et du béton ordinaire à jeune âge. Gram et Piiarinen [178] ont observé des retraits plastiques deux à trois fois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés (Figure 2.41).

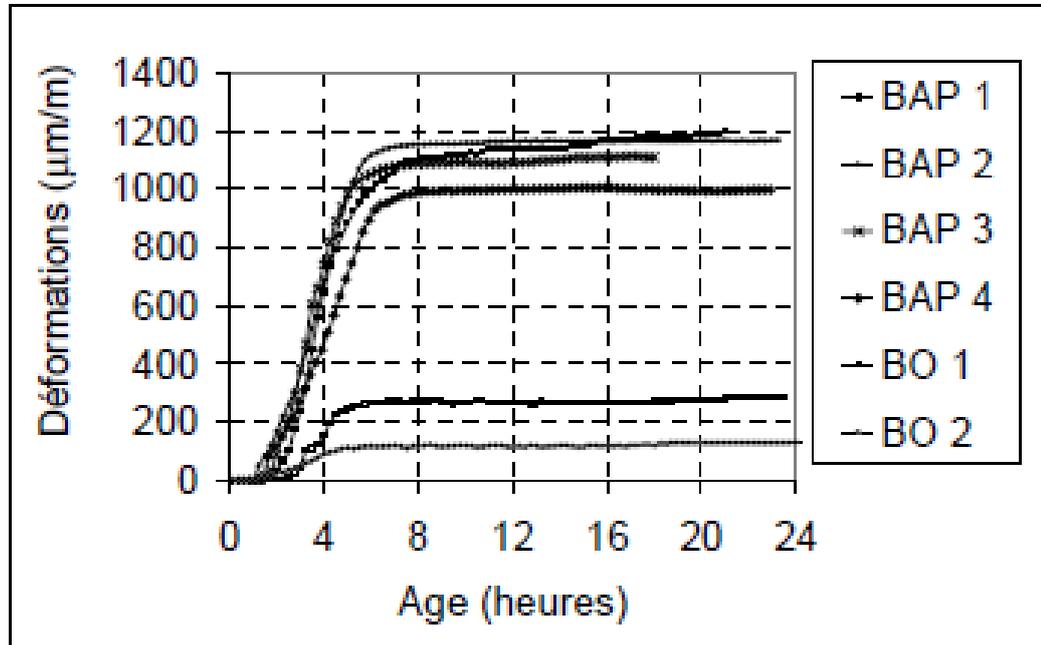


Figure 2.40: Retrait plastique des formules de BAP et de BO dérivés [177].

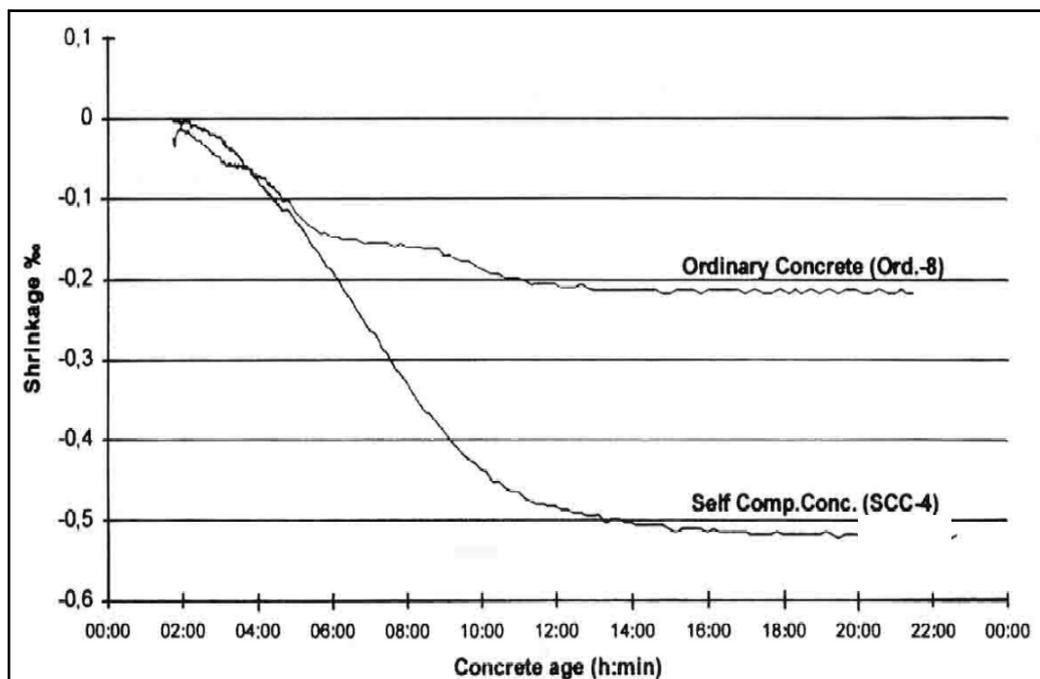


Figure 2.41: Retrait plastique d'un BAP et d'un béton vibré [178].

Loukili et al. [179] ont étudié plusieurs formulations de BAP et de bétons ordinaires. Ils ont montré que le retrait plastique est plus important dans le cas des bétons autoplaçants. La différence de l'amplitude du retrait entre les deux types de bétons provient principalement de la quantité d'eau de ressuage qui offre au béton une protection naturelle contre l'évaporation. Or les bétons autoplaçants se caractérisent par un ressuage très faible en raison de leur haute teneur en liant et la présence des agents de viscosité. Par conséquent, la vulnérabilité des bétons autoplaçants aux fissures de retrait plastique peut être associée au faible rapport eau/ liant qui peut générer rapidement la dépression capillaire.

Turcry [176], a constaté que la nature des fines influence le retrait plastique. Ce dernier augmente aussi avec la surface spécifique. L'emploi d'un ciment fin ou d'une addition minérale engendre un réseau poreux très resserré et donc des pressions capillaires rapidement élevées sous l'effet du séchage ou de l'hydratation. En effet, des études ont montré que l'utilisation des cendres volantes, augmente considérablement le retrait plastique (Figure 2.42).

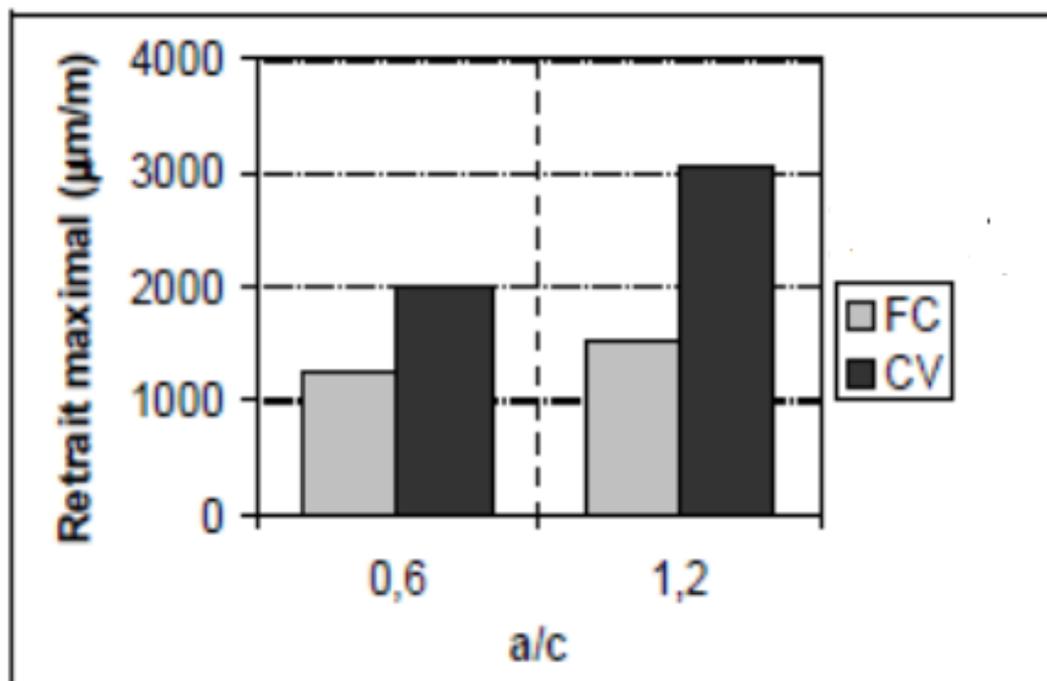


Figure 2.42 : Effet de l'addition de cendres volantes sur le retrait plastique [176].

2.5. Influence des additions minérales sur la durabilité des MAP et BAP

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver dans les conditions prévues les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect, dans son environnement. Principalement dans le béton, plusieurs types de fluides peuvent pénétrer et mettre en péril sa durabilité, l'eau (pure ou chargée d'ions agressifs), le gaz carbonique ou l'oxygène.

La structure poreuse de la pâte de ciment hydraté et du béton durci peut être caractérisée à travers des paramètres tels que la porosité, la distribution de la taille des pores ou la connectivité des pores. Ces paramètres influencent aussi bien les propriétés mécaniques que la durabilité du béton par l'intermédiaire des propriétés de transferts. En effet, le béton résiste d'autant mieux à l'action des eaux agressives que sa porosité et sa perméabilité sont faibles.

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en termes de compacité et de nature chimique du liant. Particulièrement, la présence des additions minérales peut modifier la structure poreuse des pâtes de ciment, mortiers ou bétons. Le cas des cendres volantes, le laitier et la fumée de silice. Un de leurs effets les plus notables est de réduire la proportion de portlandite dans les hydrates. Cette réduction de la portlandite s'accompagne en général d'un affinement des pores et des capillaires, et donc, d'une réduction de la perméabilité. Cela peut apporter un gain important vis-à-vis la durabilité.

2.5.1. Porosité

Le béton ou mortier est un matériau poreux. En d'autres termes, il comporte des pores ou vides. Ces pores sont déterminants pour la résistance et la durabilité du béton. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs. La structure poreuse des bétons ou mortiers est constituée de pores capillaires et de pores d'hydrates (pores de gel). Les pores capillaires, les plus gros, influencent fortement les propriétés de transfert des bétons, surtout lorsqu'ils sont interconnectés. La porosité peut être divisée en fonction de sa position par rapport au milieu extérieur en 3 catégories [180]:

- Les pores interconnectés : ils forment un espace connecté dans le milieu poreux et participent au transport de la matière à travers le matériau.
- Les pores aveugles : ils sont interconnectés d'un seul côté et peuvent être accessibles à un fluide extérieur mais ils ne participent pas au transport de matière. .
- Les pores isolés: ils ne communiquent pas avec le milieu extérieur.

La porosité fermée (pores isolés) correspondant à l'ensemble des pores ou cellules fermées qui joue un rôle important vis-à-vis des propriétés mécaniques et thermiques. Cependant, elle n'est pas concernée par les phénomènes d'écoulement. La porosité accessible (pores interconnectés et pores aveugles) est responsable du processus de transport de la pâte de ciment durci et sa vulnérabilité face aux agents agressifs.

Le rapport rapport E/C influence considérablement la porosité du béton. Plus le rapport E/C est élevé plus la porosité est importante, de même une augmentation de la durée de cure diminue le diamètre moyen des pores [51]. Les résultats de certaines études montrent que la structure des pores dans le BAP, y compris le volume total des pores, la distribution et le diamètre des pores, est très similaire aux bétons à haute performances (BHP). Par rapport à un béton ordinaire, la microstructure du BAP est signalé à être plus dense [54].

La présence des ajouts minéraux peut également influencer le développement de la structure poreuse des pâtes de ciment. En effet, selon Barluenga et al. [181], l'utilisation d'additions minérales actives modifie considérablement la microstructure des pâtes de ciment conduisant à améliorer les propriétés mécaniques des BAP. Cachova et al. [182] ont affirmé que les valeurs de la porosité (ouverte) des pâtes de ciment diminuent avec l'augmentation de la quantité de pouzzolane. Par rapport au mélange de référence, une baisse de 2%, 5% et 10% a été remarquée pour une substitution de pouzzolane de 10%, 30% et 50% respectivement. D'autres résultats [73] ont prouvé que la substitution du ciment par le laitier a tendance à diminuer la porosité du béton après 28 jours de cure. Cependant, Bouikni et al. [183] ont analysé la structure poreuse des bétons avec 50% et 65% de laitier. Les auteurs ont constaté une augmentation de la porosité totale avec l'augmentation du taux de laitier.

2.5.2. Absorption capillaire

L'absorption capillaire est l'un des mécanismes de transfert de l'eau dans les matériaux poreux. Ce phénomène résulte des tensions de surface dans les capillaires. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton dépend de la structure poreuse du matériau (porosité ouverte, taille et interconnexion des pores) et de la vitesse d'absorption par remontée capillaire (sorptivité) qui dépend elle-même de l'état hydrique du matériau.

Les spécificités de composition des BAP (volume de pâte élevé, présence d'additions minérales) pourraient les conduire à avoir une valeur d'absorption d'eau différente de celle des bétons courants. Zhu et Bartos [184] ont montré que pour la même classe de résistance, l'absorption capillaire des bétons autoplaçants est significativement plus faible que celle des bétons vibrés.

Deboucha et al. [97] ont réalisé une étude sur l'influence de la pouzzolane naturelle sur les propriétés des mortiers. Comme le montre la figure 2.43, une diminution de l'absorption capillaire des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle a été constatée, particulièrement pour une teneur de substitution de 40% où la réduction est de l'ordre de 45% comparé au mortier témoin. Ce phénomène a été lié à la densification de la structure poreuse en présence de la pouzzolane naturelle par la formation de C-S-H supplémentaires due à des réactions pouzzolanique. Les résultats de recherches effectués par Omrane et al. [100] montrent aussi l'effet bénéfique de la pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire. En effet il a été constaté une diminution des valeurs du coefficient de sorptivité avec l'incorporation de la pouzzolane comparé au béton de référence. Une baisse de 22%, 16% et 18% pour des taux de substitution de 5%, 10% et 15% respectivement comparé au béton sans addition (Figure 2.44). Par ailleurs, Ghrici et al. [185] ont constaté que le remplacement partiel du ciment par la pouzzolane naturelle réduit la sorption du béton. En effet, l'incorporation de 30% de pouzzolane naturelle entraîne une réduction du coefficient de sorptivité de 34% comparé aux compositions de références à 90 jours d'âge (Figure 2.45). Ce résultat a été expliqué par la formation de gel C-S-H secondaire du à la réaction pouzzolanique conduisant à la diminution des pores capillaires et par conséquent la réduction de l'absorption capillaire du béton. Les mélanges de béton contenant 20% de pouzzolane naturelle et 10% de fillers calcaires présentent une sorptivité inférieure à celle du béton de références. Une réduction de l'ordre de 25% et 31% a été notée pour un rapport E/L de 0,4 et 0,6 respectivement.

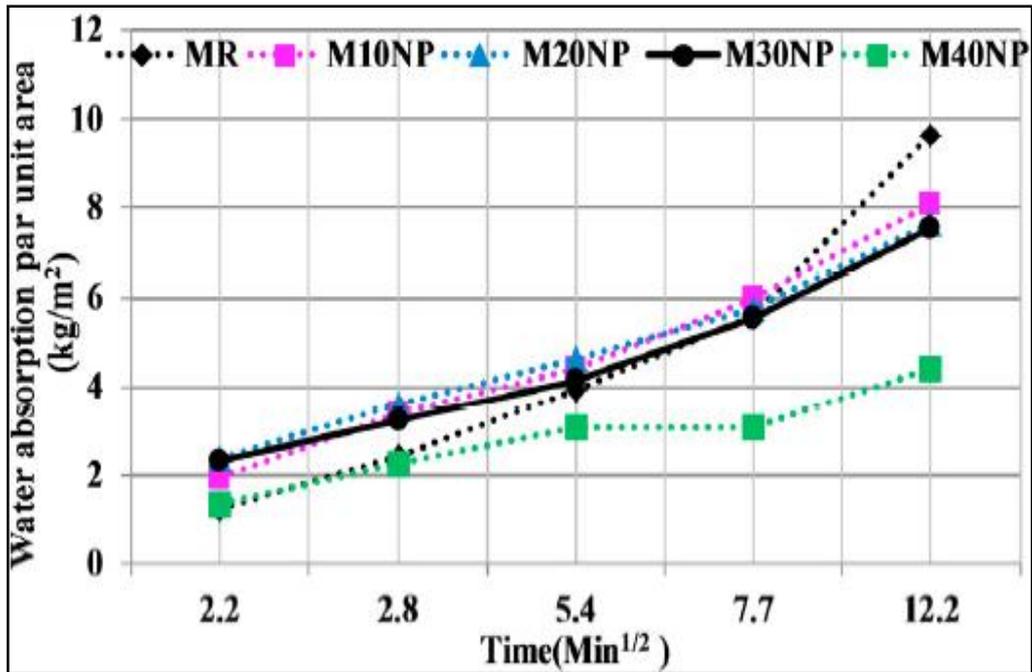


Figure 2.43: Absorption capillaire des mortiers à base de pouzzolane naturelle [97].

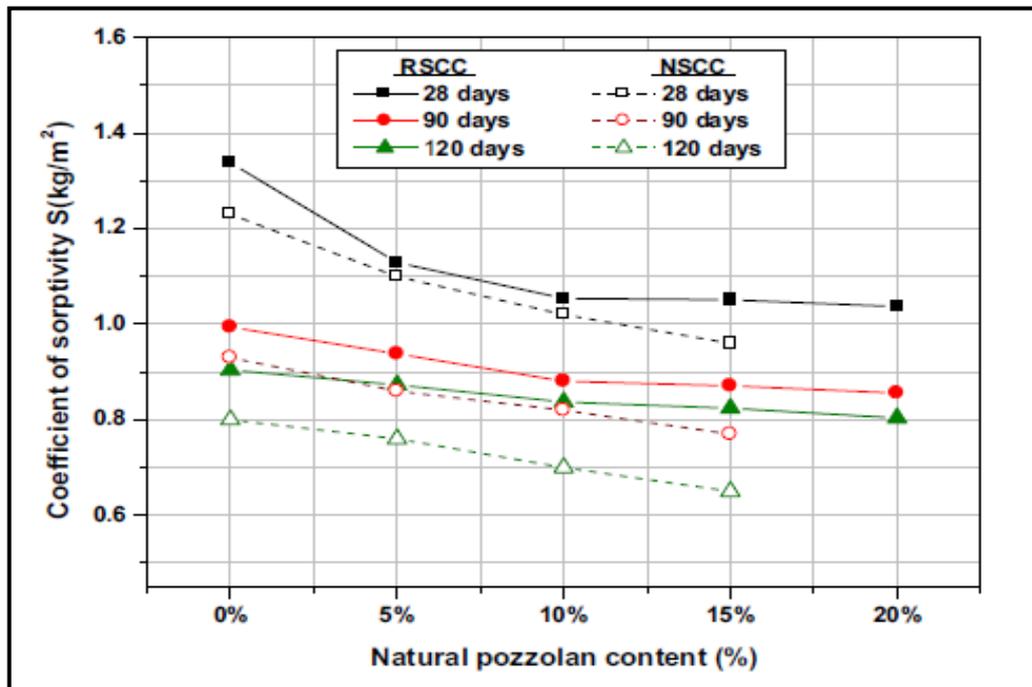


Figure 2.44: Influence de la pouzzolane naturelle sur le coefficient de sorptivité [100].

Selon les résultats de Cachova et al. [182], le coefficient d'absorption d'eau des pâtes de ciment diminue avec l'augmentation de la quantité de pouzzolane. Lorsque le ciment est substitué de 10%, 30% et 50% d'addition, la sorptivité diminue de 10%, 36%, et 57% respectivement comparé au mélange témoin (Figure 2.46).

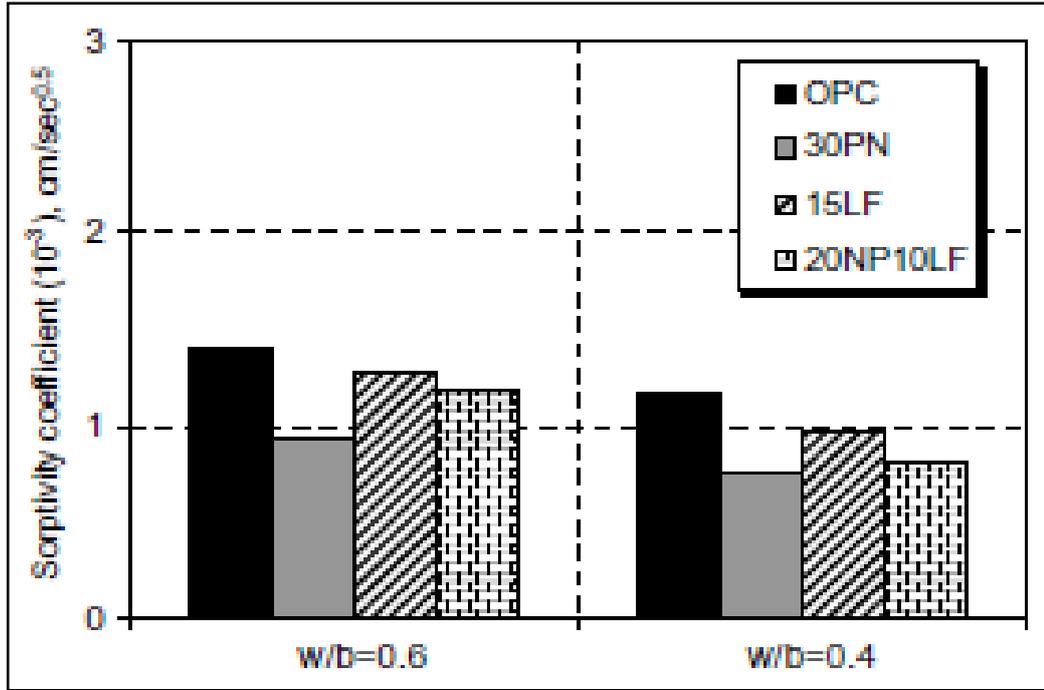


Figure 2.45: Coefficients de sorptivité des bétons à 90 jours [185].

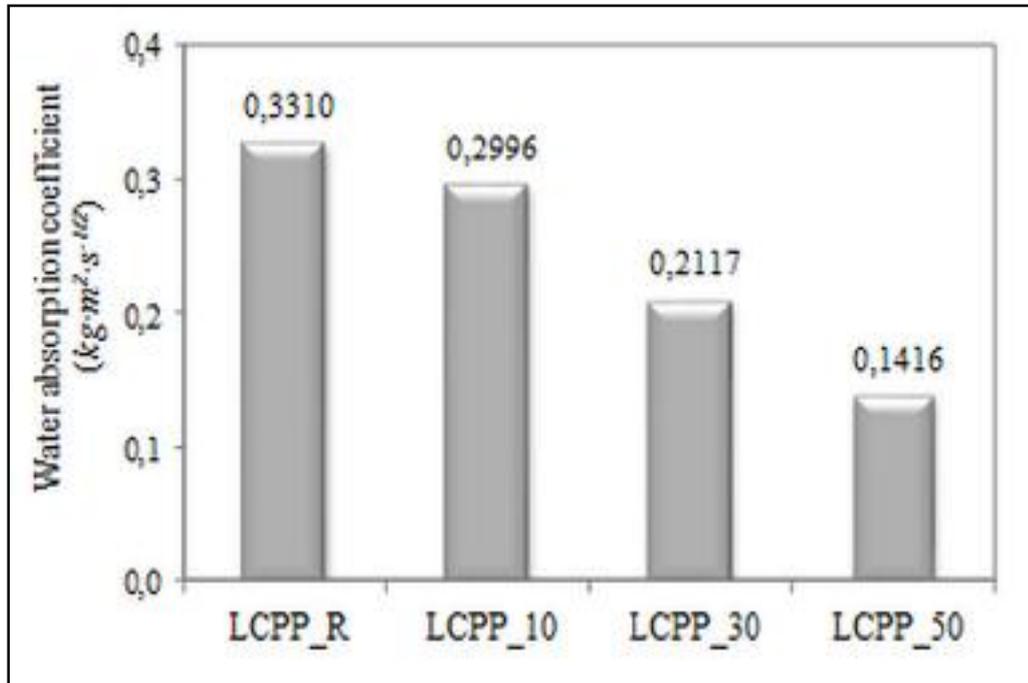


Figure 2.46: coefficients de sorptivité des bétons à 90 jours [182].

L'effet positif du laitier sur l'absorption capillaire des mortiers et bétons a été rapporté dans la littérature, pour de faibles taux en laitier [186], mais particulièrement pour des taux de substitution supérieurs à 50% [187]. Adam et al. [188], ont étudié l'influence de la

teneur du laitier 30%, 50% et 70% sur les propriétés de durabilité des bétons. Leurs résultats ont montré une tendance de réduction des valeurs de sorptivité des échantillons au laitier. Selon l'étude de Hadj sadok [189], l'absorption capillaire des mortiers au laitier est plus faible comparé au mortier témoin à 90 comme à 360 jours. L'auteur a également affirmé que le coefficient d'absorption présente des valeurs moins importantes pour les compositions au laitier. En effet, à 90 jours, comparé au mortier de référence, une diminution de 16% a été enregistrée pour le mortier contenant 30% de laitier contre 32% pour le mortier contenant 50% de laitier, atteignant 35% après 360 jours de maturation. Ce phénomène a été expliqué par le raffinement de la structure poreuse des mortiers au laitier par la formation du gel C-S-H du à l'hydratation de l'addition. En effet, l'auteur a constaté une bonne corrélation linéaire montrant une réduction du coefficient d'absorption avec la diminution du rayon moyen de la porosité. Par ailleurs, Vivek [190] prouve que l'incorporation du laitier dans les compositions des BAP à des teneurs de 25% à 75% a des avantages sur les caractéristiques de durabilité. Il a été constaté que la substitution du ciment par 50% de laitier conduit à une réduction significative de la sorptivité comparé au béton contrôle (Figure 2.47).

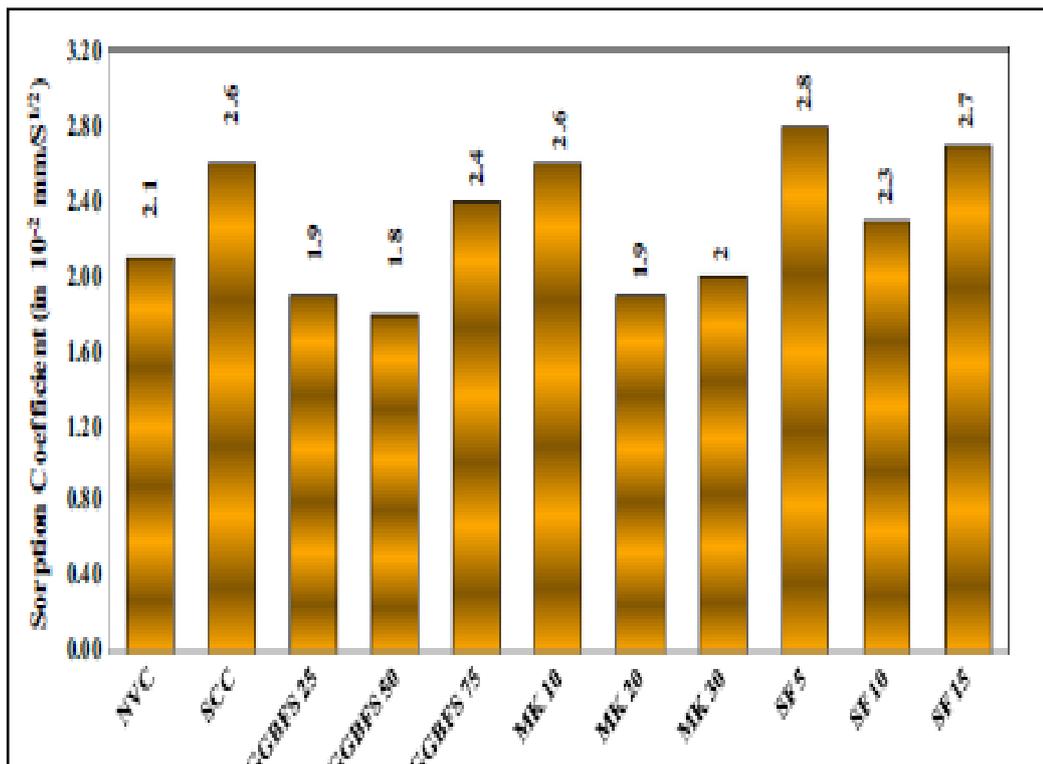


Figure 2.47: Influence du laitier sur le coefficient d'absorption [190].

Ce résultat a été lié à la finesse du laitier qui améliore la congglomération des mélanges de béton en augmentant ainsi la résistance à l'absorption capillaire. Prasanna et al. [191] étudient l'effet du laitier sur la résistance et la durabilité des bétons fibrés. Leurs expériences révèlent que lorsque la quantité du laitier augmente dans le béton, le taux d'absorption d'eau diminue (Figure 2.48). Les auteurs ont également constaté que l'absorption capillaire diminue avec l'augmentation de la période de cure. Selon Yahyaoui et al. [73], l'incorporation de 15% et 25% de laitier dans les compositions de BAP conduit à une légère diminution de l'absorption capillaire comparée au BAP témoin. Ceci a été expliqué par le fait que l'absorption par capillarité est liée au développement de l'hydratation et au remplissage des pores par les hydrates supplémentaires formés à 90 jours d'âge. Il a été également montré que les formulations de béton contenant du laitier présentent une faible sorptivité que le béton de référence (Figure 2.49). Hammat et al. [192] ont également confirmé que l'absorption capillaire des MAP diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier. Par ailleurs, il a été conclu que l'augmentation de la surface spécifique de l'addition n'a pas un effet significatif sur les valeurs d'absorption d'eau. Cependant, les résultats de Langaroudi et al. [69] illustrés sur la figure 2.50 montrent que l'addition de 45% de laitier dans les formulations de béton conduit à une augmentation de 47,2% et de 30,91% pour l'absorption initiale et finale respectivement comparé à celle du béton sans addition à 90 jours de cure. Un effet contraire a été remarqué lorsque le ciment est substitué par la fumée de silice.

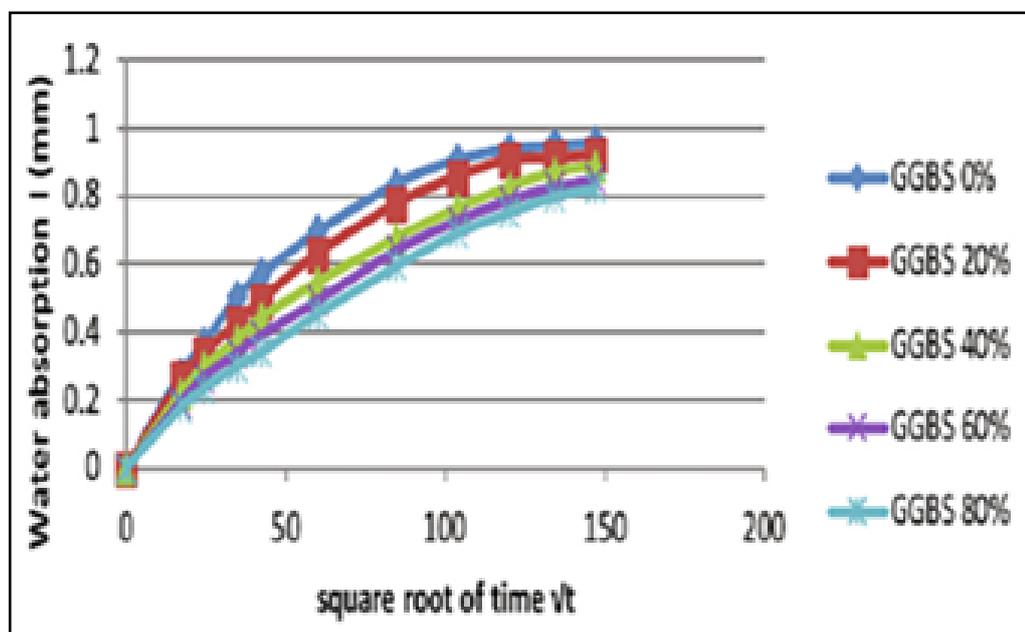


Figure 2.48: Effet du laitier sur le coefficient d'absorption [191]

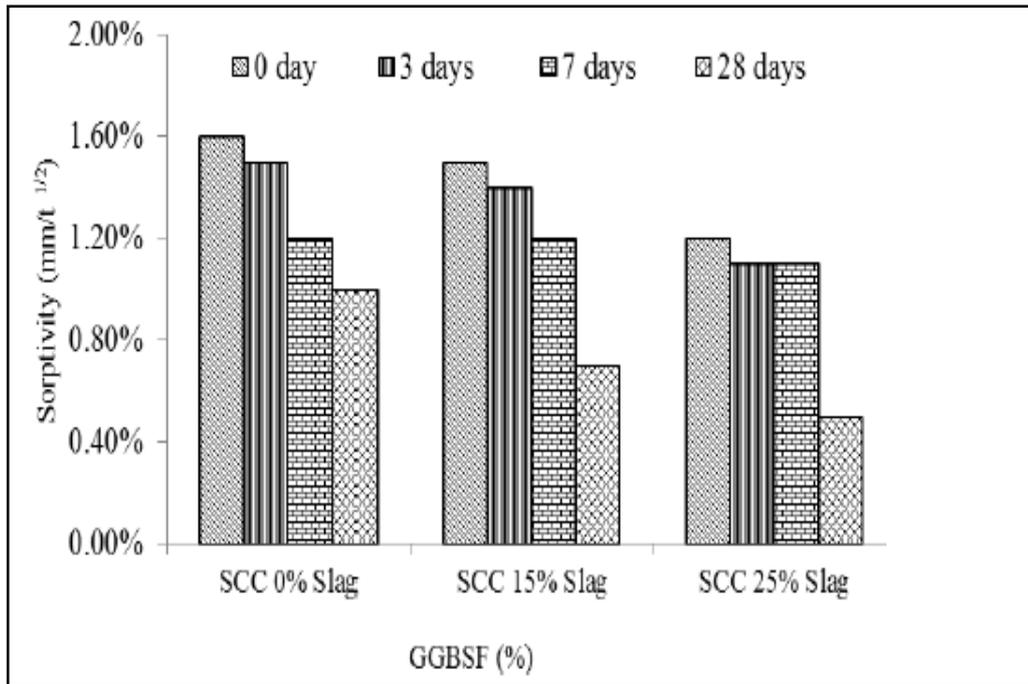


Figure 2.49: Influence du laitier sur le coefficient d'absorption des BAP [73].

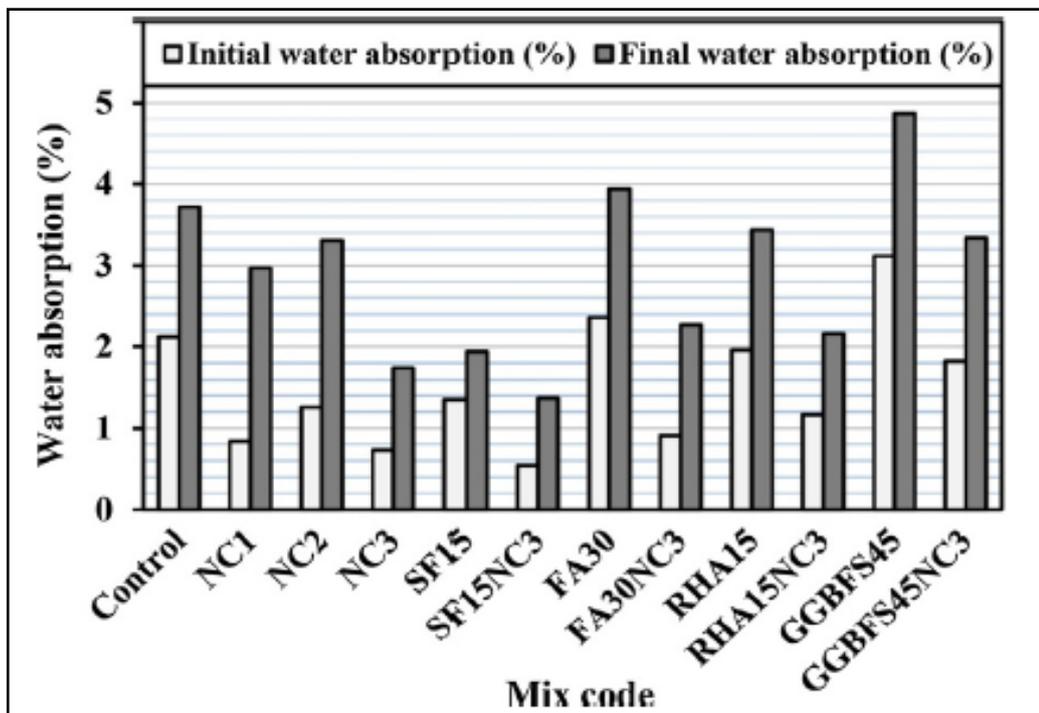


Figure 2.50: Influence du laitier sur l'absorption capillaire [69].

D'autres études [26] ont confirmé que les additions minérales (les cendres volantes (FA), la poudre de grés (PS), la poudre de calcaire (LP) et la fumée de silice (SF)) sont bénéfiques pour la réduction de l'absorption capillaire.

2.5.3. Perméabilité

La perméabilité du béton est une grandeur physique qui représente la capacité du matériau poreux à être traversé par un fluide (liquide ou gaz) sous un gradient de pression. La perméabilité est un paramètre pouvant influencer directement la durabilité des structures en béton en contrôlant la vitesse de pénétration d'agents agressifs. La perméabilité du béton durci est liée à la nature du réseau poreux de la pâte de ciment hydratée. En effet, c'est un paramètre qui dépend directement de la distribution des pores, aussi de leurs dimensions, de leurs formes et de leur connectivité.

Selon la littérature, le rapport E/C influence significativement la dimension des pores [193]. En effet, la porosité devient plus importante et la structure poreuse plus grossière lorsque le rapport E/C augmente. Par conséquent, la perméabilité du matériau s'amplifie par la facilité des transferts des fluides de l'extérieur vers l'intérieur. Les spécificités de composition des BAP peuvent également affecter la perméabilité des bétons. Selon Kanellopoulos et al. [194], un volume de pâte plus important peut a priori être un handicap pour ce type de bétons. Cependant, l'utilisation d'additions minérales peut être bénéfique. La densification de la matrice cimentaire qu'elle engendre peut éventuellement diminuer la perméabilité du béton.

Adekunle et al. [101] ont étudié l'influence de la pouzzolane naturelle sur les propriétés des BAP. Ils ont montré que les formulations de béton contenant de la pouzzolane présentent des profondeurs de pénétration de l'eau inférieures à 30 mm, une valeur limite qui permet de classer le béton comme un matériau à faible perméabilité (Figure 2.51). Une valeur de 9,9 mm a été notée pour les bétons ternaires contenant de la pouzzolane naturelle et les fillers calcaires et 12,2 mm pour ceux incorporant de la pouzzolane et du laitier. La figure 2.52 présente les résultats de perméabilité à l'eau des BAP confectionnés à base de laitier [103]. Ces résultats montrent que l'incorporation du laitier dans les compositions de béton augmente considérablement la résistance à la pénétration de l'eau. A 90 jours de cure, les mélanges élaborés avec 15% et 30% de laitier ont montré une diminution de la profondeur de pénétration d'environ de 42,4% et 19,8% respectivement comparé à ceux sans laitier. Ce résultat a été expliqué par l'effet positif du laitier à long terme qui engendre une diminution de la taille des pores conduisant ainsi à une baisse de perméabilité.

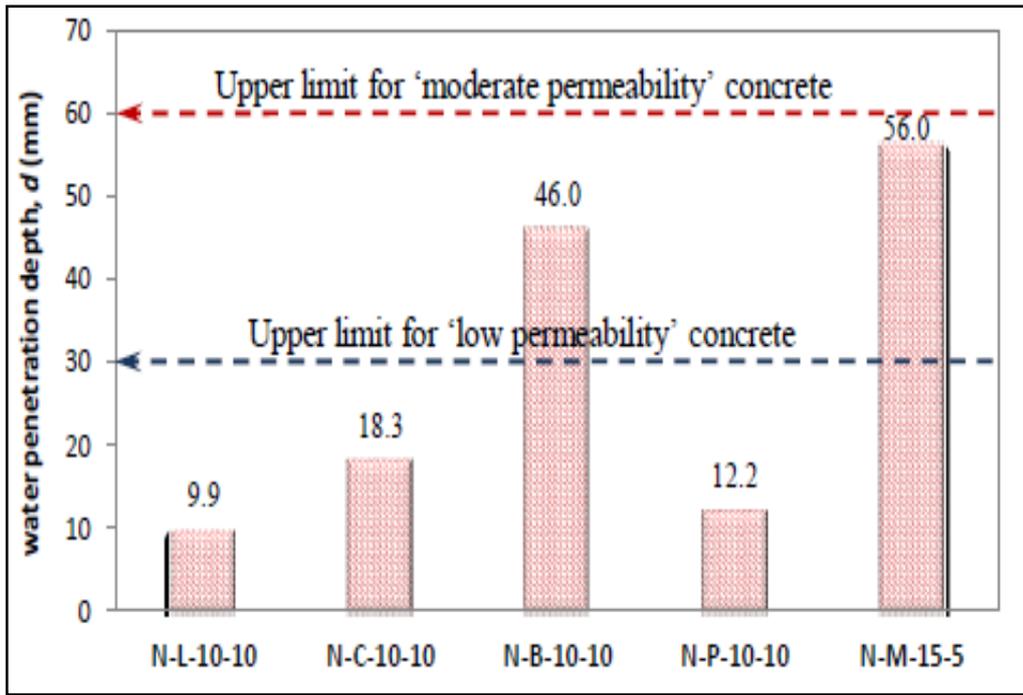


Figure 2.51 : Profondeur de pénétration de l'eau des mélanges de BAP [101].

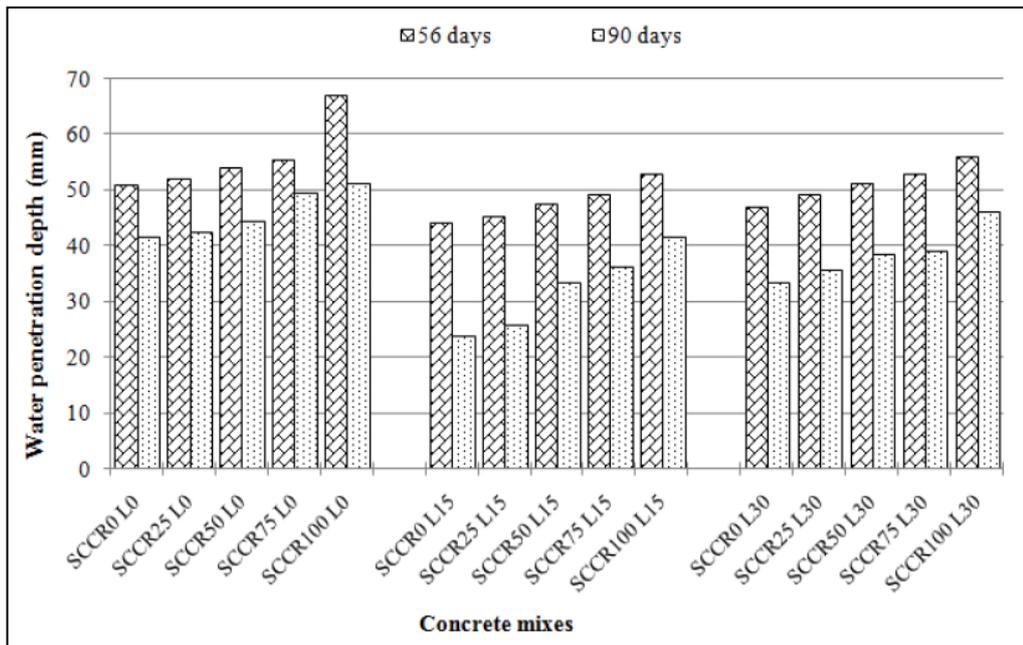


Figure 2.52 : Profondeur de pénétration de l'eau des BAP au laitier [103].

Similaires observations ont été également révélées par Yahyaoui et al. [73] où il a été affirmé que la substitution du ciment par 15% et 25% de laitier conduit à une diminution de la profondeur de pénétration de l'eau de l'ordre de 14,41% et 23,37 respectivement comparé au béton sans addition (Figure 2.53).

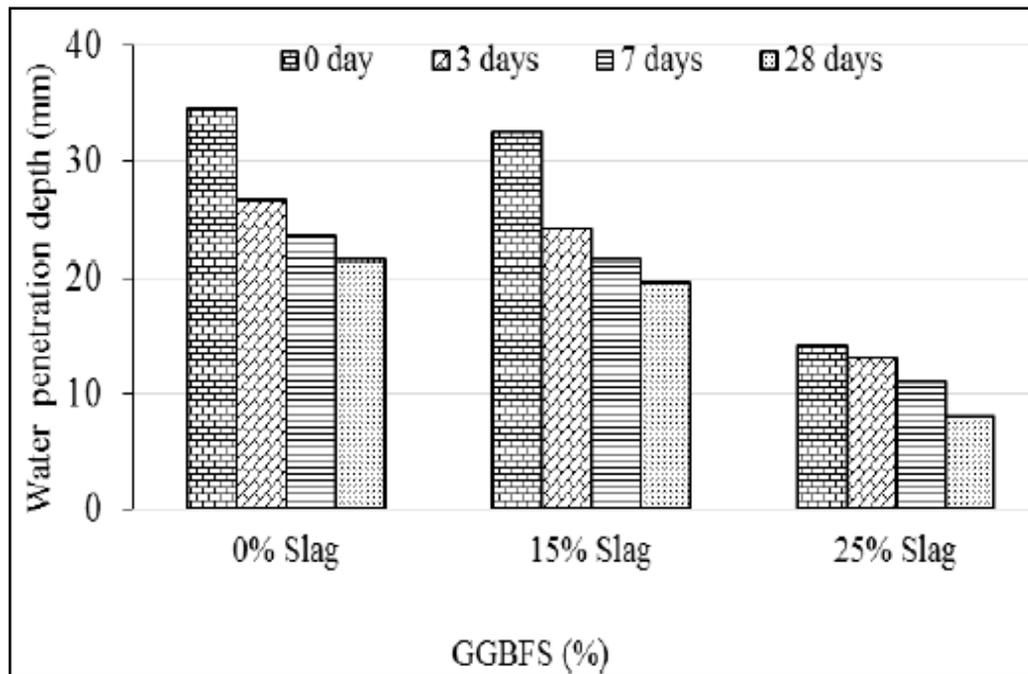


Figure 2.53 : Influence du laitier sur la perméabilité à l'eau des BAP [73].

Da Silva et de Brito [195] ont expliqué ce phénomène par la grande compacité et une faible connexion du système poreux des pâtes de ciment confectionnées à base d'additions minérales. Une autre étude menée par Hadjsadok [189] sur le comportement des mortiers et bétons à base de ciment au laitier a montré qu'après 28 jours de cure et pour un rapport E/L égal à 0,65, les bétons au laitier présentent une profondeur de pénétration de l'eau nettement plus importante que celle donnée par un béton confectionné avec un ciment Portland CEMI. Une augmentation de 16% et 18 % a été enregistrée pour une substitution de 30% et 50% respectivement. Après 90 jours de maturation, la perméabilité à l'eau des bétons au laitier (15% et 30%) est comparable à celle du béton témoin. L'amélioration de la perméabilité des bétons au laitier à 90 jours a été expliquée par l'hydratation tardive du laitier, qui contribue tardivement au remplissage des pores et au raffinement de la porosité de la matrice cimentaire [189].

Une autre recherche [196] a prouvé que l'incorporation du métakaolin dans les compositions de BAP a un effet bénéfique sur leur perméabilité. En effet une diminution de 25% environ a été remarquée lorsque le ciment est substitué par 10% de métakaolin. Cela a été attribué à la formation de produits d'hydratation issus de la réaction pouzzolanique. De plus, il a été conclu que l'augmentation de la surface spécifique du

métakaolin à 7000 cm²/g réduit la taille des pores grâce à l'effet de remplissage conduisant ainsi à une baisse de perméabilité [197].

2.5.4. Diffusion des ions chlorures

La durabilité des bétons est liée à la pénétration d'agents agressifs dans son réseau poreux. La diffusion des ions chlorure est un paramètre de transport relatif à cette pénétration. Cette dernière est généralement décrite comme correspondant à un processus de diffusion due à la différence de concentration entre le milieu environnant et le matériau. Ces chlorures, peuvent provenir de diverses sources (sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles et des granulats contaminés ou d'adjuvants contenant des chlorures). La présence des ions chlorures au niveau des armatures amorce la dissolution de la couche protectrice enrobant l'acier et initie ainsi le processus de corrosion, cause de dégradation des structures en béton armé. La vitesse de pénétration des chlorures dépend de la porosité de la pâte du ciment, elle décroît avec le rapport E/C, et dépend de la concentration de la solution environnante en sels.

Les travaux de Ghrici et al. [185] illustrés sur la figure 2.54 montrent que la perméabilité aux ions chlorure diminue considérablement lorsque le rapport E/L est réduit de 0,6 à 0,4. Par ailleurs, les auteurs ont constaté que les bétons à pâtes de ciment ternaire présentent de meilleures performances face à la pénétration des ions chlorures comparé aux bétons binaires (E/L = 0,6). Cependant pour E/L égal à 0,4, le béton contenant 30 % de pouzzolane naturelle présente une perméabilité aux ions chlorure moins importante comparé aux mélanges de béton ordinaire et celui contenant des fillers calcaires. Des résultats similaires ont été obtenus par Omrane et al. [44]. En effet, il a été prouvé que la pénétration des ions chlorure des BAP contenant de la pouzzolane naturelle est nettement inférieur à celle de BAP sans addition.

De nombreux travaux ont montré une diminution de la diffusivité des ions chlorures dans les bétons à base de ciment au laitier de hauts fourneaux. Hadj sadok [189] a montré qu'après 90 jours de cure humide, 30% de laitier réduit le temps de passage des chlorures. Toutefois, une meilleure perméabilité aux ions chlorure a été observé pour les bétons à 50% de laitier, avec un temps de passage important et un faible taux de diffusion.

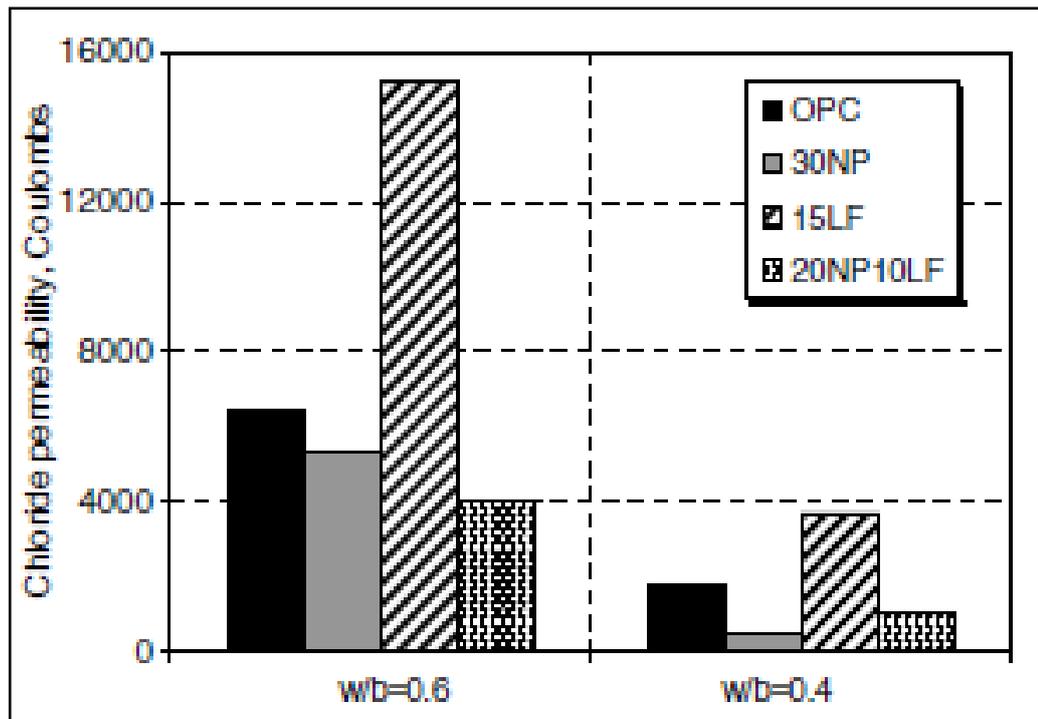


Figure 2.54 : Perméabilité des ions chlore des bétons à 90 jours [185].

D'autres recherches [127] ont étudié l'effet des cendres volantes et du laitier sur les propriétés des BAP. Le laitier a été introduit dans les compositions de béton à des teneurs de 20%, 30% et 40%. Il a été affirmé que le coefficient de diffusion des ions chlorure diminue avec l'augmentation du taux de laitier (Figure 2.55). Par ailleurs, il a été constaté que les échantillons au laitier présentent un coefficient de diffusion d'ions chlorure inférieur à celui des mélanges contenant des cendres volantes. La faible diffusion des chlorures dans les bétons au laitier a été expliquée par le fait que les hydrates (CSH additionnel) formés par l'hydratation du laitier, contribuent, non seulement à remplir les pores capillaires, mais également à réduire la connectivité de ces pores [198].

Les avantages de la substitution du ciment par des additions minérales sur les propriétés de transfert sont également confirmés par d'autres études [142]. En effet, il a été prouvé que l'ajout de 15% de cendres volantes (FA), 15% de laitier (BFS) et 5% de métakaolin (MK) conduit à une nette réduction du coefficient de diffusion des chlorures des BAP comparé au béton sans additions. De plus, en comparant l'effet du métakaolin et celui du laitier, il s'est avéré que l'incorporation du métakaolin à une teneur de 5% conduit à l'obtention d'un coefficient de diffusion des chlorures inférieur à celui à 15% de laitier.

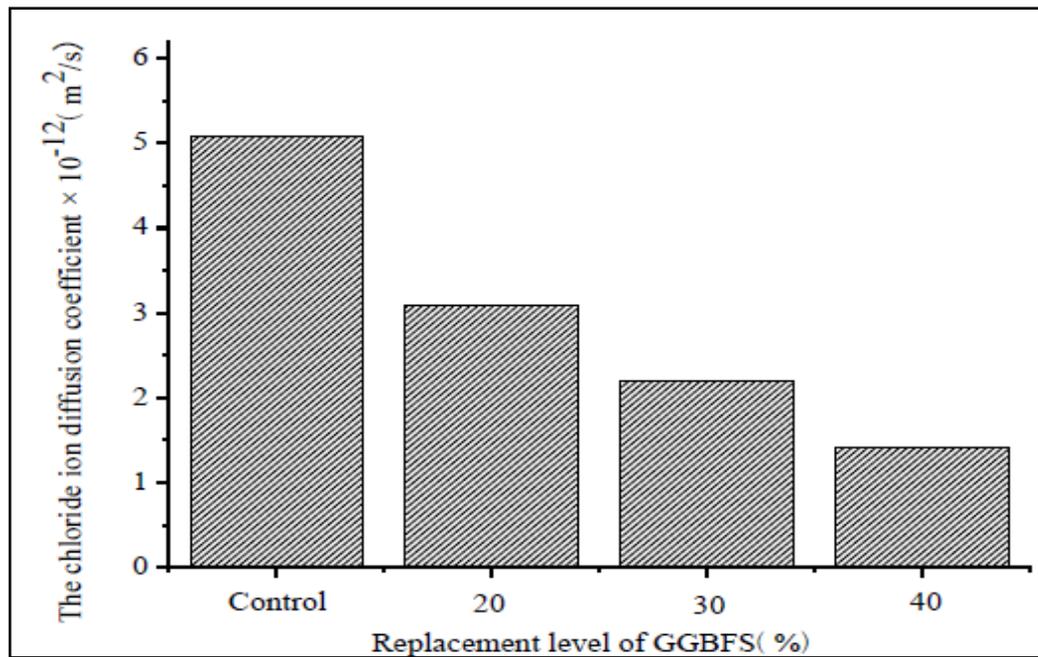


Figure 2.55 : Influence du laitier sur la perméabilité à l'eau des BAP [127].

2.6. Conclusion

Les caractéristiques des MAP et BAP à l'état durci sont fortement influencées par leur composition. En effet, il existe une relation entre le type, le taux de substitution ainsi que la surface spécifique de l'addition utilisée dans la pâte de ciment et les propriétés mécaniques et physico-chimique de ces matériaux cimentaires.

Les additions minérales permettent soit par l'effet physique granulaire favorable, de remplir la porosité de la matrice cimentaire, ce qui favorise les résistances à court terme par la réduction du besoin en eau. Ces fines sont aussi susceptibles, par l'effet éventuellement chimique, de modifier le processus d'hydratation du ciment et la structuration des hydrates, ou de réagir en milieu cimentaire et former de nouveaux produits hydratés (liant hydraulique latent ou liant pouzzolanique).

L'incorporation du laitier, de la pouzzolane naturelle ou des cendres volantes à tendance à diminuer le retrait de dessiccation. Tandis que le laitier engendre une augmentation des déformations endogènes par réduction de la taille des pores capillaires qui induit une augmentation des pressions capillaires. Pour les indicateurs de durabilité, l'emploi des ajouts minéraux dans le BAP présentent une amélioration de la structure interne. En effet,

elle présente une distribution porosimétrique plus dense, qui conduit à une diminution de la taille des pores et par conséquent la diminution de la perméabilité au gaz, la diffusion des ions chlore, et l'absorption capillaire. Il a été constaté un manque d'études de l'effet de la finesse des ajouts minéraux sur les performances des BAP à l'état durci. Ceci fera l'objet du chapitre 4.

CHAPITRE 3

MATERIAUX, FORMULATION ET METHODES D'ESSAIS

3.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des principales caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés. La méthode de formulation des mortiers autoplaçants adoptée ainsi que les différents essais réalisés sont également exposés. L'étude expérimentale a été réalisée au niveau du laboratoire de Géo- matériaux et de Génie Civil de l'Université de Blida 1.

3.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

Le comportement d'un MAP est le résultat d'une interaction entre ses divers constituants. Pour cette raison, nous commençons ce chapitre par une présentation des matériaux mis en œuvre pour confectionner les mélanges de mortiers ainsi que leurs proportions.

3.2.1. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment de type CEMII/A 42,5 commercialisé par la cimenterie de Lafarge. Les principales propriétés physico-mécaniques de ce ciment sont détaillées dans le tableau 3.1. Le tableau 3.2 présente le détail de la composition chimique et minéralogique du ciment utilisé.

Tableau 3.1 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.

Rc vraie à 28 j (MPa)	ρ_{abs} (kg/m ³)	ρ_{app} (kg/m ³)	SSB (m ² /kg)	Début de prise (h)	Fin de prise (h)
45,55	3040	1170	310	2h54	4h36

Tableau 3.2 : Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé.

Composition chimique (%)									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF	RI
63,40	21,06	3,60	4,47	1,85	2,00	0,13	0,57	1,65	1,35
Composition minéralogique (%)									
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF			
67,40		9,89		7,98		13,59			

3.2.2. Additions minérales

Deux types d'additions minérales différentes par leur nature chimique et minéralogique ont été utilisés pour la substitution du ciment, le laitier d'EL Hadjar et la pouzzolane naturelle. Afin de pouvoir utiliser ces matériaux dans les différentes formulations du mortier autoplaçant (MAP), ils ont été préalablement séchés dans une étuve à 50 C° et ceci dans le but d'éliminer toute éventuelle humidité et de faciliter leur broyage. Les additions ont été ensuite broyées à trois finesses différentes : 350 m²/kg, 420 m²/kg et 500 m²/kg. Un broyeur à boulets d'une capacité de 5 kg a été utilisé pour le broyage des additions minérales (Figure 3.1). La variation de la finesse de la pouzzolane naturelle et du laitier d'El Hadjar en fonction du temps de broyage est présentée sur la figure 3.2.



Figure 3.1 : Broyeur à boulets.

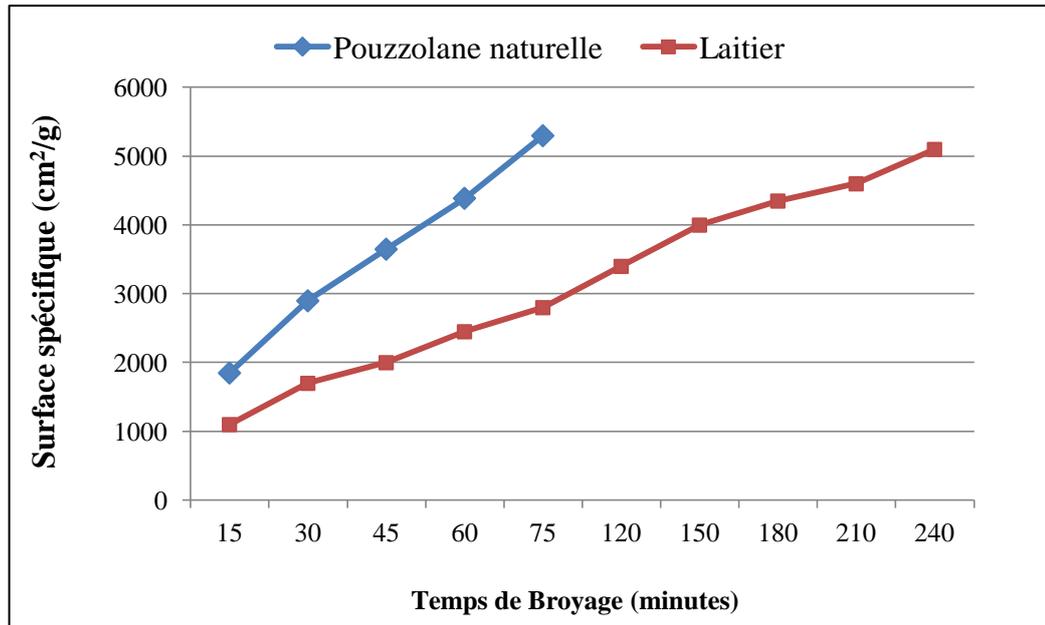
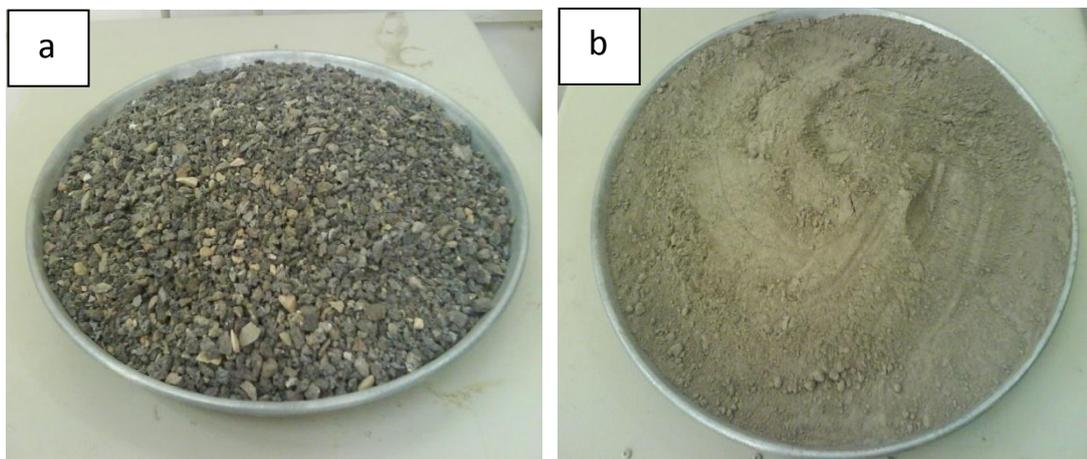


Figure 3.2 : Variation de la finesse des ajouts minéraux en fonction du temps de broyage.

3.2.2.1. Pouzzolane naturelle

Pour la substitution du ciment, une pouzzolane naturelle provenant de la région de Béni-Saf a été utilisée (Figure 3.3). La pouzzolane se présente sous forme de pierres concassées de couleur variant du noir au rouge selon le degré d'oxydation du fer. Cette addition a été broyée à trois finesses différentes : 350, 420 et 500 m²/kg pour un temps de broyage de 43, 57 et 70 min respectivement. La masse volumique absolue de la pouzzolane utilisée est égale à 2810 kg/m³. Le tableau 3.3 récapitule la composition chimique de la pouzzolane naturelle.



Figur 3.3 : Pouzzolane naturelle : (a) avant broyage, (b) après broyage.

Tableau 3.3 : Composition chimique de la pouzzolane naturelle.

Composition chimique de la pouzzolane naturelle (%)								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	HCl	Ia
45,67	15,10	10,14	8,98	3,45	3,00	0,19	nul	0,81

3.2.2.2. Laitier

Le laitier des hauts fourneaux est un sous produit de la fabrication de la fonte des usines sidérurgiques. Le laitier utilisé provient du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (wilaya d'Annaba). Ses particules sous forme de grains sphériques de couleur jaunâtre avec un aspect poreux (Figure 3.4). Le laitier est ensuite réduit en poudre à trois finesses différentes : 350, 420, 500 m²/kg. Le temps de broyage est fixé à 125, 165 et 234 min respectivement. La masse volumique absolue du laitier est égale à 2850 kg/m³. La composition chimique de l'addition est donnée par le tableau 3.4.

Une bonne hydraulité du laitier est assurée par une alcalinité élevée qui est définie par le rapport de la somme des oxydes basique à la somme des oxydes acides (CaO + MgO)/(SiO₂). Selon la littérature [199], le laitier peut être basique dans le cas où son indice de basicité «M_b» est supérieur à 1. Inversement, si l'indice de basicité est inférieur à 1, le laitier est classé comme acide.

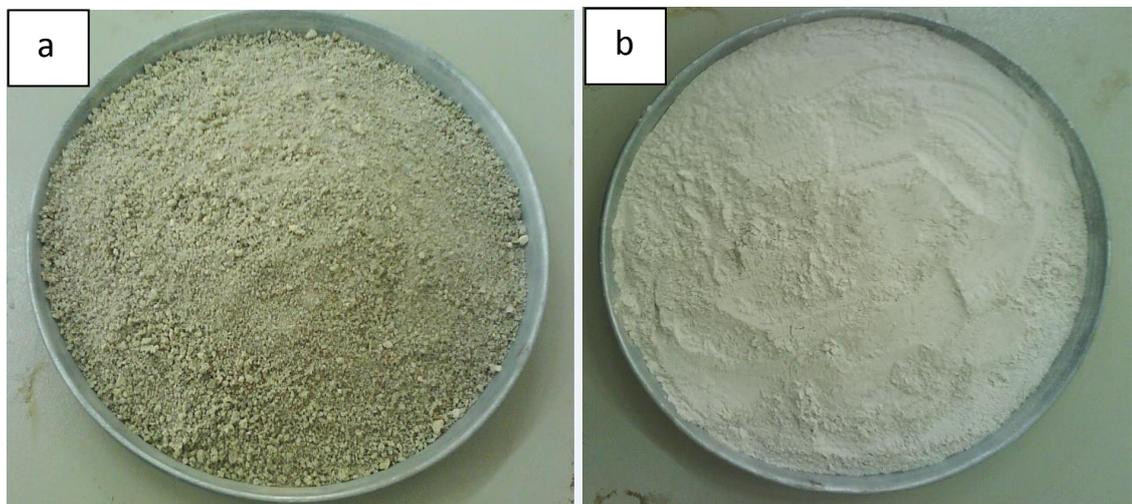


Figure 3.4: Laitier de haut fourneau : (a) avant broyage, (b) après broyage.

Tableau 3.4 : Composition chimique du laitier.

Composition chimique du laitier (%)								
Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
40,10	6,00	2,00	42.20	4,70	2,60	1,20	0,15	1,20

Pour le laitier utilisé dans notre étude :

$$M_b = \frac{CaO (\%) + MgO (\%)}{SiO_2 (\%)} = 1,17 \quad (3.1)$$

L'indice de basicité du laitier M_b est supérieur à 1 donc le laitier utilisé est basique.

3.2.3. Sable

Le sable utilisé est un mélange composé de 57% de sable grossier provenant de la région de Baghlia de classe granulaire 0/5 mm ($M_f = 3,32$) et de 43% de sable fin de Bougezoul de classe granulaire 0/3 mm ($M_f = 2,11$). C'est un sable dont les grains sont caractérisés par une forme roulée ayant un module de finesse M_f de 2,80. Le sable a été séché et criblé avant utilisation. Le tableau 3.5 résume les caractéristiques principales du sable utilisé. La figure 3.5 illustre la courbe granulométrique donnant la répartition des différentes tailles des grains du sable utilisé.

Tableau 3.5 : Caractéristiques du sable utilisé.

Caractéristiques physiques	Sable	Normes
ρ_{abs} (kg/m ³)	2530	NF EN 1097-6
ρ_{app} (kg/m ³)	1640	NF EN 1097-3
Coefficient d'absorption (%)	1,7	NF EN 1097-6
Module de finesse	2,80	NF EN 933-1
Equivalent de sable au piston (%)	75	NF EN 933-8
Equivalent de sable visuel (%)	76	NF EN 933-8

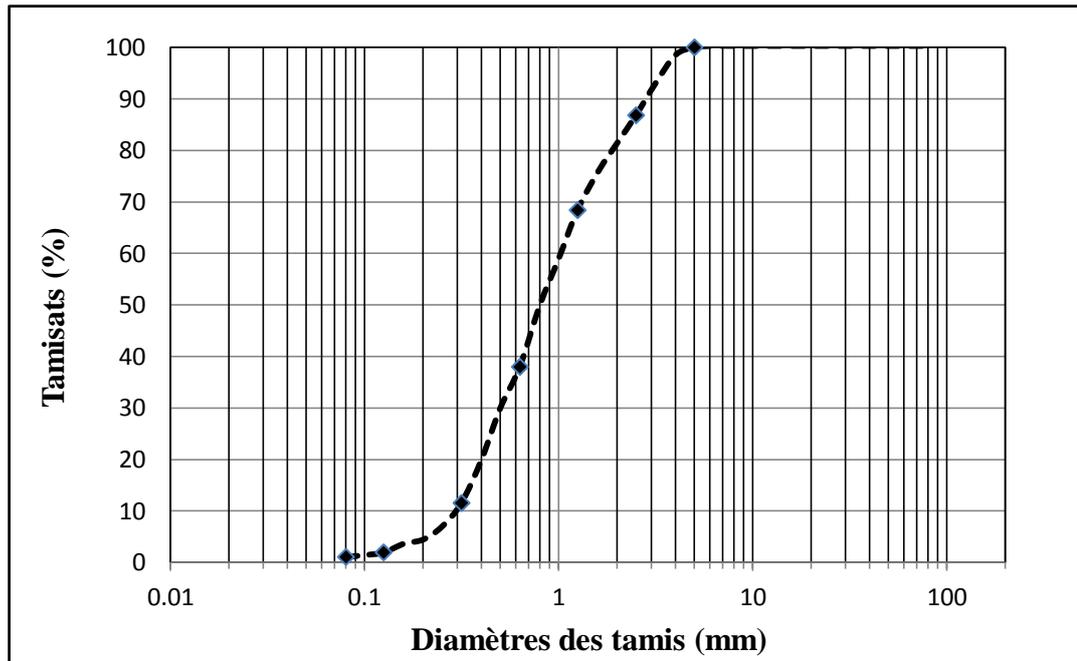


Figure 3.5: Courbe granulométrique du sable corrigé.

3.2.4. Superplastifiant

Un superplastifiant produit par la société Granitex a été utilisé pour la formulation des mortiers ; sous forme liquide et d'une couleur marron. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau de type polycarboxylate (PC) commercialisé sous le nom de Medaflow 30. Il possède 30% d'extrait sec. De densité $1,07 \pm 0,01$, le pH varie entre 6 à 6,5, la teneur en ions chlorures inférieure ou égale à 0,1%. Selon la fiche technique, le pourcentage du superplastifiant doit être compris entre 0,5 et 2% du poids de ciment.

3.2.5. L'eau de gâchage

La qualité de l'eau de gâchage peut avoir une influence négative sur les performances des mortiers et des bétons. Elle doit être propre ne présentant pas un excès d'impuretés (matières organiques, élément chimiques) [50]. L'eau utilisée pour le gâchage des mortiers autoplaçants est de l'eau potable du robinet exempte d'impuretés.

3.3. Formulation et confection du mortier autoplaçant

La formulation d'un mortier autoplaçant (MAP) nécessite de trouver une combinaison optimale des matériaux constituant le mortier afin de répondre aux exigences

d'ouvrabilité (fluidité et homogénéité). De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation des bétons ou mortiers autoplaçant. La plupart des méthodes de formulation sont conçues actuellement de manière empirique. Notre contribution est d'appréhender le rôle des additions minérales sur les propriétés du mortier frais ainsi que sur les performances des MAP à l'état durci. La teneur des ajouts minéraux est fixée au préalable pour toutes les compositions étudiées. Les proportions des autres matériaux : sable, ciment, eau et adjuvant ont été déterminées en utilisant la méthode Japonaise (méthode générale) proposée par Okamura et Ouchi [1] avec quelques modifications concernant la quantité de sable dans le mortier ainsi que le rapport E/L. Ces derniers ont été évalués expérimentalement de manière à avoir des valeurs acceptables de l'étalement au cône d'Abrams et du temps d'écoulement au V-Funnel [126]. Le rapport Sable/ Mortier (S/M) a été fixé à 0,5 et le rapport Eau/Liant (E/L) à 0,38 [126]. Le dosage en superplastifiant (SP/L) est obtenu par optimisation sur mortier de référence ne contenant pas d'additions minérales, en étudiant la variation du diamètre d'étalement et celle du temps d'écoulement du mortier au V- funnel en fonction de la variation de la teneur en superplastifiant de 1,2 à 1,8% du poids du ciment. Les valeurs d'étalement doivent être comprises entre $270 \text{ mm} \leq d \leq 330 \text{ mm}$, et celles de l'écoulement entre $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$ [200]. Le calcul des proportions des différents constituants du mortier est basé sur la méthode de formulation présentée en annexe [126].

Pour le malaxage des mortiers, un malaxeur d'une capacité de 5 litres a été utilisé. La séquence de malaxage est un compromis entre une bonne homogénéisation des différents constituants et une durée de malaxage suffisamment courte pour éviter un début d'hydratation du ciment. Pour notre étude, nous avons opté pour la proposition de Domone et Jin [200] dont la procédure est récapitulée sur la figure 3.6 et qui s'articule sur les étapes suivantes :

- Malaxer le ciment et le sable pendant environ une minute afin d'homogénéiser le mélange,
- Malaxer pendant une minute avec la première quantité d'eau ($Eau_1 = 70\% \text{ Eau}$),
- Malaxer pendant une minute avec le restant de l'eau de gâchage ($Eau_2 = 30\% \text{ Eau}$) mélangée avec le superplastifiant,
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

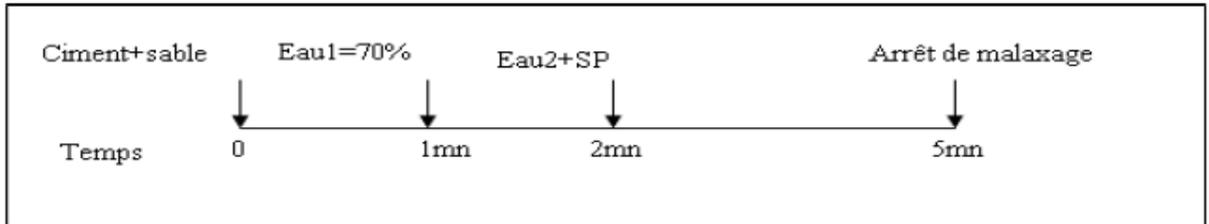


Figure 3.6: Séquence de malaxage du mortier [126].

3.4. Essais relatifs au MAP à l'état frais

3.4.1. Essai d'étalement au Mini-Cône

La caractérisation des mortiers autoplaçants (MAP) est effectuée par l'essai de l'étalement au mini-cône ayant une hauteur de 40 mm. Le principe de l'essai consiste à remplir un moule tronconique et de mesurer l'étalement du mortier sur une plaque horizontale après soulèvement du mini cône et l'arrêt de l'écoulement (Figure 3.7). L'étalement D est estimé par la moyenne de deux mesures de diamètres orthogonaux d_1 et d_2 de la galette du mortier. Une valeur du diamètre d'étalement comprise entre 270 et 330 mm est exigée pour avoir un mortier autoplaçant [200].



Figure 3.7: Essai d'étalement au mini-cône.

3.4.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel)

L'essai de l'écoulement de mortier a été réalisé à l'aide de mini-entonnoir en V, proposé par Okamura dans leur méthode Japonaise de formulation de BAP (Figure 3.8).

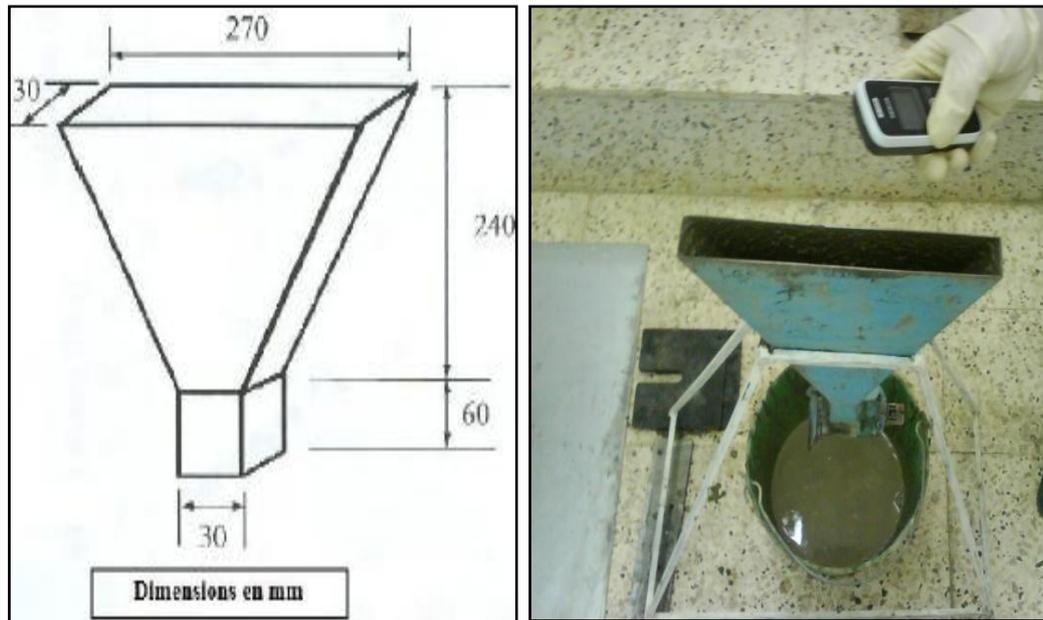


Figure 3.8: Essai d'écoulement au V-Funnel.

Le principe de l'essai consiste à remplir un entonnoir de 1,1 litre de mortier et de mesurer le temps d'écoulement entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas. Un bon mortier est caractérisé par un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 s [200].

3.4.3. Essai au rhéomètre

Le comportement rhéologique des mortiers est testé en variant le type, le taux de substitution ainsi que la finesse des additions minérales. Les paramètres rhéologiques des mortiers sont déterminés expérimentalement en utilisant un rhéomètre rotatif élaboré par l'équipe de recherche de l'université de Cergy Pontoise [47-201] de type Heidolph- RZR 2102 Control Z. Ce rhéomètre présenté sur la figure 3.9 est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation (a), d'un récipient cylindrique de dimension 10x13 cm (b) et d'un croisillon composé de deux plaques perpendiculaires de dimensions 5x10 cm (c). Le rhéomètre est piloté avec un logiciel à l'aide d'un ordinateur. En utilisant le rhéomètre Heidolph- RZR 2102 Control Z, les contraintes de cisaillement sont déterminées en imposant des taux de cisaillement sur le mortier. A partir de la courbe présentant les contraintes de cisaillement en fonction des taux de cisaillement, on peut déterminer le comportement rhéologique de chaque mortier.

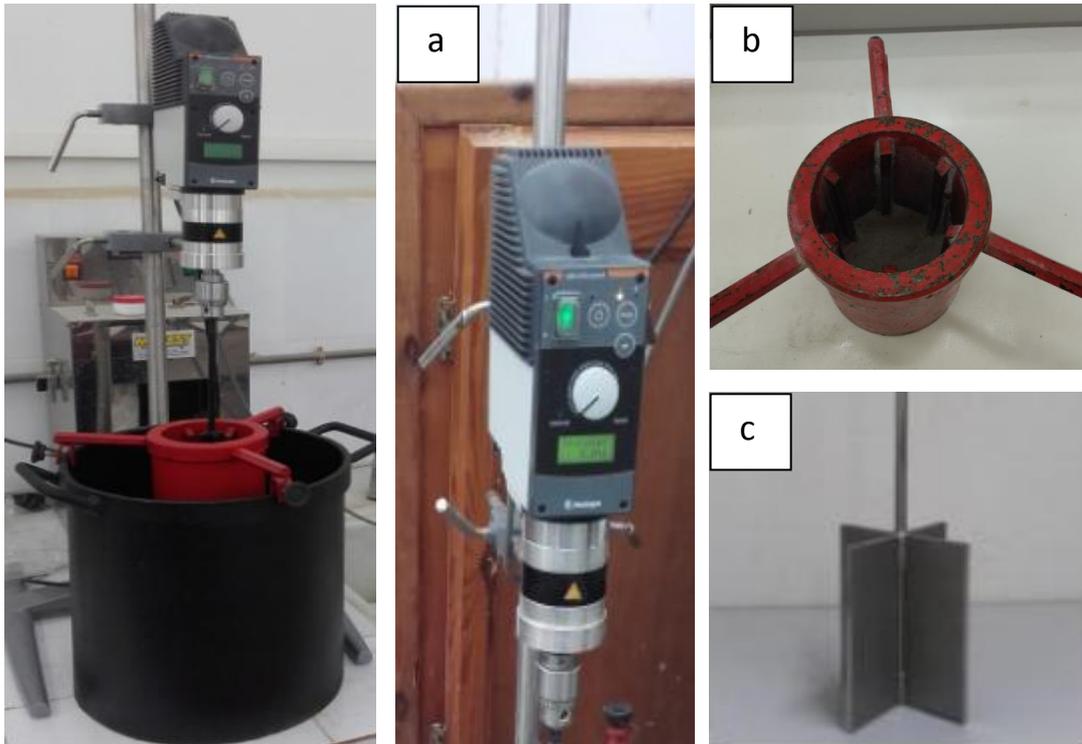


Figure 3.9: Rhéomètre à mortier Heidolph- RZR 2102.

Le principe de l'essai consiste à soumettre une pale à des mouvements de rotation à différentes vitesses dans un échantillon cylindrique de MAP frais et de mesurer le couple appliqué. L'essai au rhéomètre se déroule selon les étapes suivantes :

- Faire chauffer le rhéomètre avant la réalisation des essais en le faisant fonctionner suffisamment à la vitesse maximale de 400 tours/min,
- Mesurer ensuite les couples à vide (M_{vide}) correspondant aux vitesses imposées selon le profil de vitesse choisi
- Verser le mortier frais dans le récipient,
- Faire descendre le croisillon dans le centre du récipient, il faut s'assurer que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arasé du mortier,
- A l'aide du logiciel, démarrer la rotation du croisillon en suivant un profil de vitesse approprié et mesurer les couples totaux correspondants aux vitesses imposées (M_{total}).

Une série d'essais a été réalisée qui consiste à déterminer le profil de vitesse approprié pour le déroulement de l'essai rhéométrique permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation [201]. Afin de pouvoir bien caractériser le

comportement du mortier, le profil utilisé doit avoir suffisamment de points. Les paliers de vitesse imposés doivent être espacés pour bien distinguer les différentes paires (Ω , M). La figure 3.10 illustre le profil choisi pour le déroulement des essais.

Avec :

Ω : Le profil de vitesses imposées (tr/min),

M : Moments enregistrés par le rhéomètre (N.m).

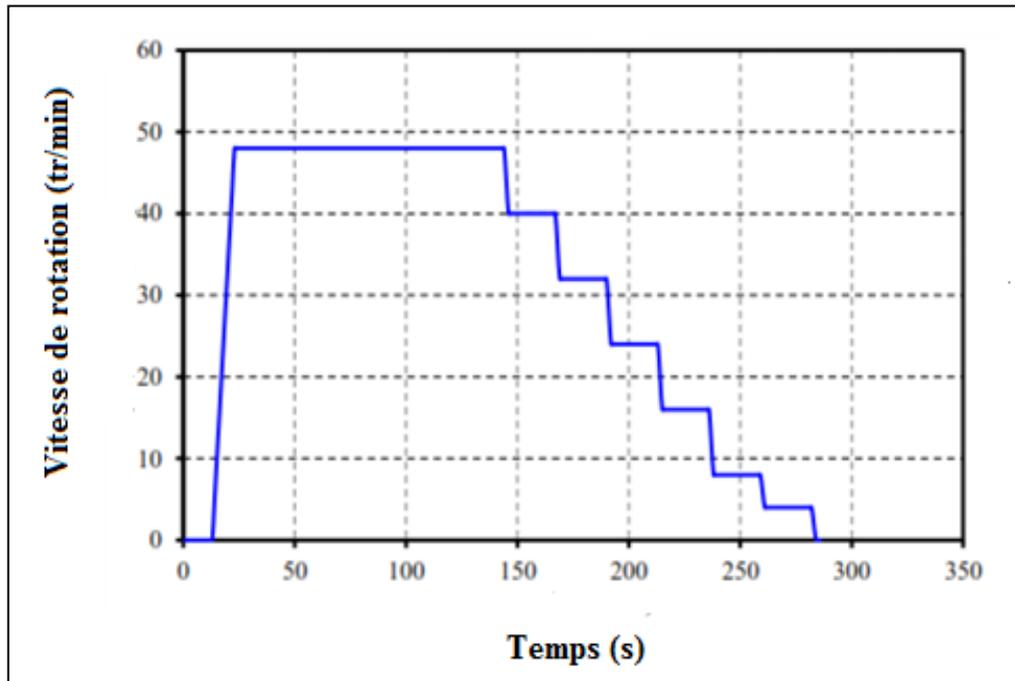


Figure 3.10: Profil de vitesse [201].

3.5. Essais relatifs au MAP à l'état durci

3.5.1. Résistance à la compression

La résistance mécanique est une propriété qui caractérise généralement la qualité des mortiers. L'importance de cette grandeur en terme de qualité du béton est liée directement à la composition de la pâte de ciment. L'essai de résistance en compression a été effectué conformément à la norme NF EN 196-1 [202] à l'aide d'une presse hydraulique d'une capacité de 250 kN (Figure 3.11). Les tests de compression de tous les mortiers étudiés ont été effectués sur des éprouvettes de forme prismatique de

dimensions (4x4x16) cm³. Pour chaque gâchée et chaque échéance de mesure, trois prismes ont été confectionnés. Au total, 105 éprouvettes ont été destinées pour l'essai de compression. Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées à une humidité HR de 100% et à une température de 20 C° sans échange hydrique avec l'extérieur jusqu'au moment des essais. La résistance à la compression à été déterminée pour cinq échéances de conservation (1, 7, 28, 56, 90 et 180 jours). À l'âge requis, chaque prisme est centré entre les deux plateaux du dispositif de l'essai et sur lequel est appliquée une charge croissante progressive jusqu'à la rupture. La valeur de la résistance en compression retenue est la moyenne des résistances déterminées sur trois éprouvettes.



Figure 3.11 : Dispositif pour l'essai de compression.

3.5.2. Retrait total et retrait endogène

L'essai de retrait présente les propriétés intrinsèques du matériau indépendamment de tout chargement mécanique extérieur appliqué. L'essai de retrait a été effectué conformément au mode opératoire précisé par la norme NF P15-433 [203]. La mesure des variations volumiques a été effectuée sur des éprouvettes prismatiques de mortier de dimensions (4x4x16) cm³. Au moment du coulage, des ancrages (plots en inox) sont placés aux deux extrémités de l'échantillon et fixés sur le moule qui servira à le positionner sur l'appareil de mesure. Les parois internes sont enduites d'huile, afin de faciliter le démoulage. Après la fabrication des mélanges, les moules sont recouverts d'un polyane humide pendant 24 h

afin d'éviter toute évaporation précoce de l'eau. La mesure du retrait a été réalisée par un comparateur numérique de précision de $1\mu\text{m}$ illustré sur la figure 3.12. Les éprouvettes destinées pour la mesure du retrait total ont été conservées dans une pièce dont la température est maintenue à $20\text{ C}^{\circ}\pm 1$ et l'humidité relative à $55\% \pm 5$ [204].

Les éprouvettes de mortier, âgées de 1 jour, destinées pour la mesure du retrait endogène sont protégées de la dessiccation après décoffrage par une double couche d'aluminium afin d'éviter tout échange hydrique avec le milieu extérieur. Les essais de retrait ont été réalisés pendant une durée de trois mois pour tous les mélanges.

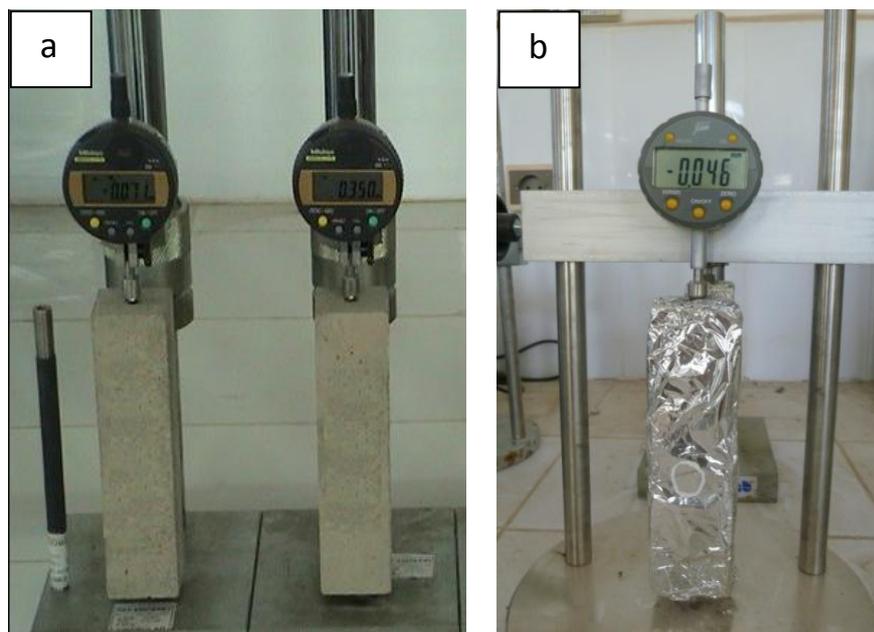


Figure 3.12: Essai de retrait (a) retrait total (b) retrait endogène.

3.5.3. Absorption capillaire

La structure poreuse des bétons et mortiers est constituée de pores capillaires, les plus gros influencent fortement les propriétés de transfert des bétons et plus particulièrement s'ils sont interconnectés. L'essai d'absorption d'eau par capillarité permet de déterminer la quantité d'eau absorbée indiquant ainsi le degré de porosité du matériau.

L'essai consiste à mesurer le taux d'absorption par capillarité des éprouvettes de mortiers de dimensions $(4 \times 4 \times 16)\text{ cm}^3$ mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. L'essai d'absorption capillaire est réalisé conformément aux recommandations de la

procédure d'ASTM [204]. Les éprouvettes sont confectionnées et conservées dans l'eau (HR de 100% et T de 20°C) pendant la période de maturation de 90 jours. Les échantillons sont séchés dans une étuve ventilée jusqu'à masse constante ($\Delta M < 0,1\%$ en 24 heures). La surface latérale des éprouvettes a été enduite sur une hauteur de 1 cm par de la résine afin d'éviter tout échange hydrique radial (Figure 3.13). L'échantillon est placé sur deux appuis collés sur le fond d'un bac rempli d'eau jusqu'à une hauteur de 2 ± 1 mm à partir de la base de l'éprouvette. Pendant toute la durée de l'essai, ce niveau d'eau est maintenu constant. La variation de la masse est mesurée après 1 mn, 5 mn, 10 mn, 20 mn, 30 mn, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h. A chaque échéance de mesure, les éprouvettes sont essuyées avant leur pesée à l'aide d'une éponge. Les différentes pesées ont été prises à l'aide d'une balance de précision de 0.01g. Le coefficient d'absorption capillaire, I, est défini par la relation suivante :

$$I = \frac{M_x - M_0}{axd} \text{ (mm)} \quad (3.2)$$

Où :

I : coefficient d'absorption capillaire (mm),

M_x : la masse de l'éprouvette à l'âge t (g),

M_0 : la masse initiale de l'éprouvette (g),

a : la surface de l'éprouvette en contact avec l'eau (mm^2),

d : Masse volumique de l'eau (g/mm^3).

La sorptivité est une propriété du matériau qui permet de caractériser sa tendance à absorber et à transmettre l'eau par capillarité. Le coefficient de sorptivité peut être déterminé par la relation suivante:

$$S = \frac{(Q/A)}{\sqrt{t}} \quad (3.3)$$

Où :

S: le coefficient de sorptivité du matériau ($\text{cm}/\text{s}^{1/2}$),

Q : le volume d'eau absorbé en (cm^3),

A : surface du spécimen en contact avec l'eau en (cm^2),

t : temps (s).

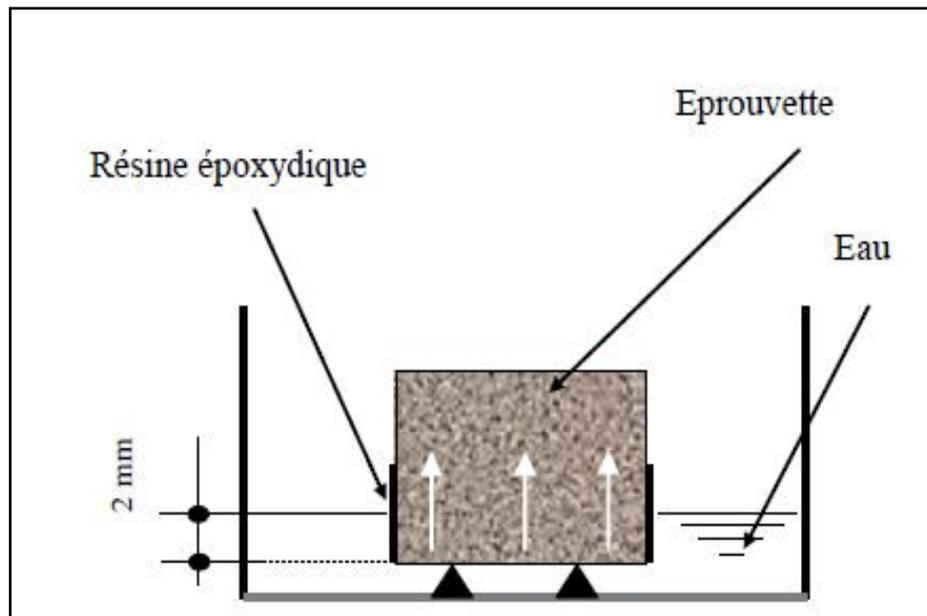


Figure 3.13: Dispositif de mesure de l'absorption par capillarité.

3.6. Récapitulatif du programme expérimental

Le programme expérimental réalisé ainsi que les variables étudiées sont résumés dans les organigrammes présentés sur les figures précédentes 3.14 et 3.15. La première étape de la procédure expérimentale consiste à optimiser le dosage du superplastifiant sur un mortier composé uniquement de ciment comme liant en faisant varier la teneur de 1,2% à 1,8% du poids du ciment. Le dosage de Sp optimisé sur mortier de référence sera fixé pour toutes les compositions de mortiers. En seconde partie, l'effet du type, de la teneur ainsi que la finesse des additions minérales sur les propriétés rhéologique et les performances des MAP à l'état durci a été étudié. Le laitier et la pouzzolane naturelle ont été introduits à des teneurs de 15% et 30%. Trois finesses ont été étudiées 350, 420 et 500 m²/kg.

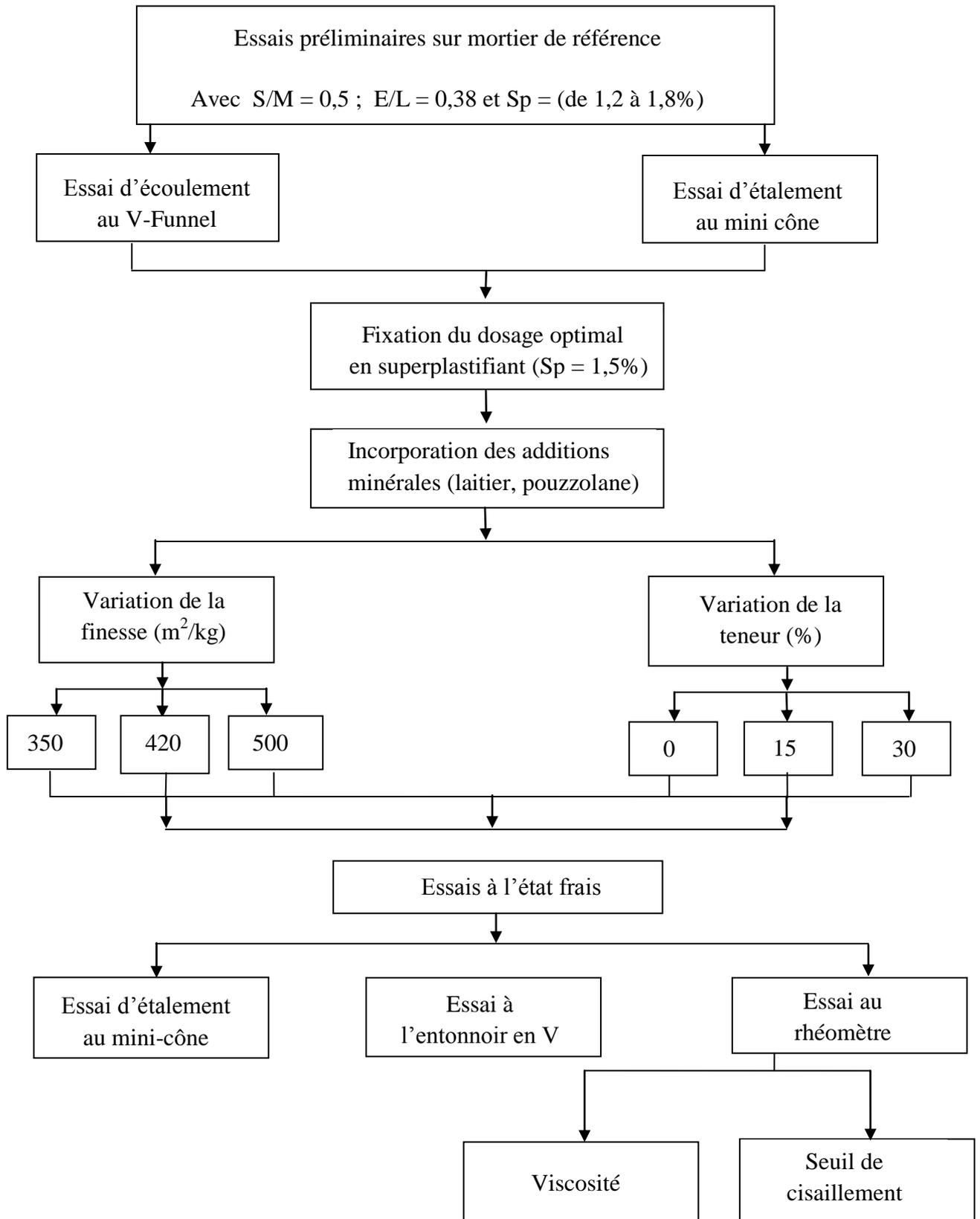


Figure 3.14: Organigramme des essais expérimentaux sur MAP à l'état frais.

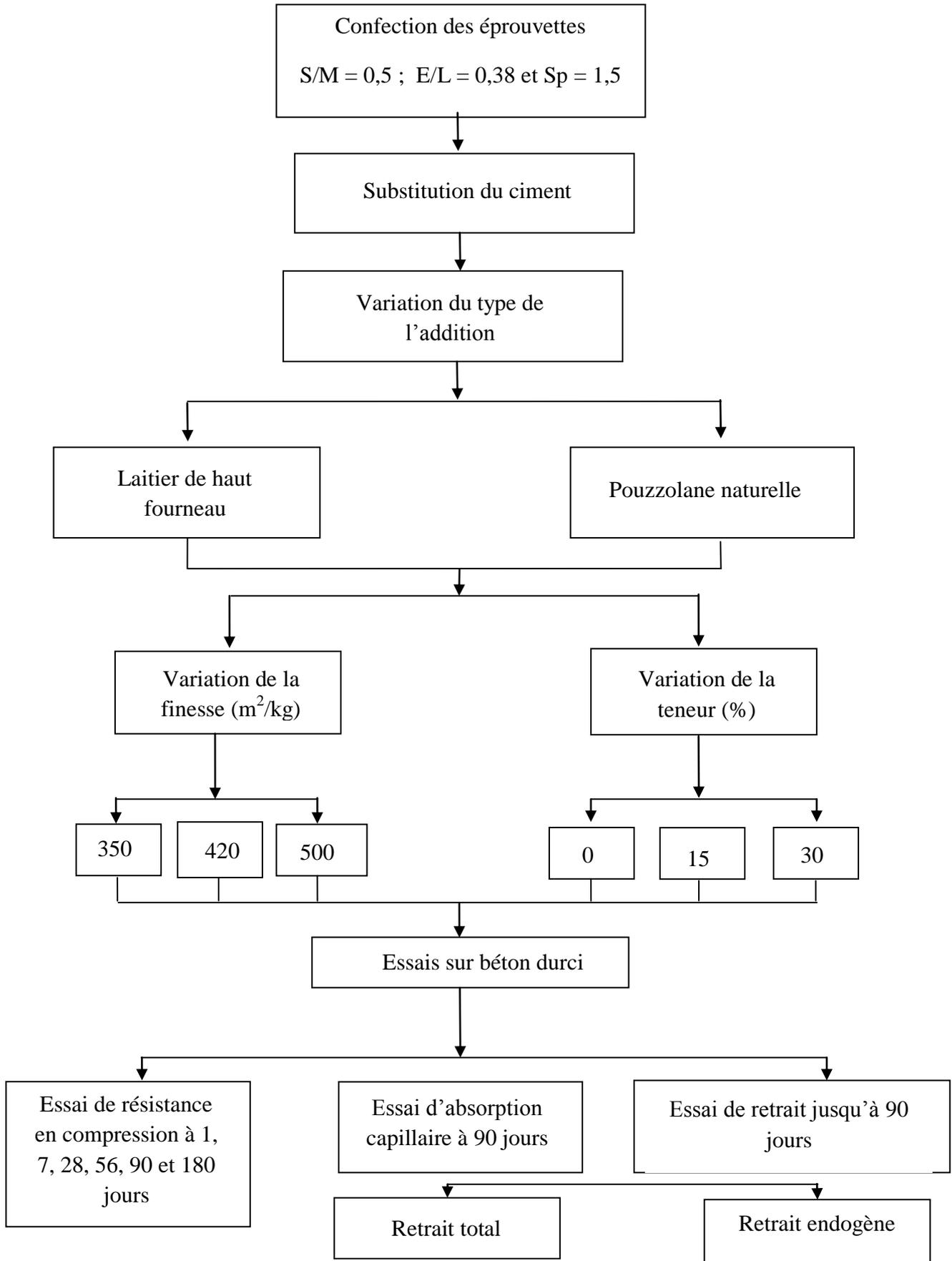


Figure 3.15: Organigramme résumant le programme expérimental sur MAP à l'état durci.

CHAPITRE 4

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, sont exposés les résultats des différents essais réalisés sur mortiers autoplacants (MAP) à l'état frais et à l'état durci. Les résultats obtenus sont comparés avec d'autres recherches de la littérature. Dans la première partie du présent chapitre, les résultats d'essais d'optimisation du dosage en superplastifiant (effectués sur mortier de référence) sont présentés. La deuxième partie concernera l'étude de l'influence des additions minérales ainsi que l'effet de leurs finesses sur l'ouvrabilité et les propriétés rhéologiques des MAP. A l'état durci, l'influence de la teneur et la finesse des ajouts minéraux sur la résistance en compression, le retrait (retrait total et retrait endogène) ainsi que sur l'absorption capillaire est exposée.

4.2. Optimisation du dosage en superplastifiant (Sp/L)

Dans le but d'étudier l'influence de la teneur et la finesse des additions minérales sur les propriétés des mortiers, une optimisation de la composition de ce dernier est nécessaire. Pour cela, le dosage en superplastifiant doit être constant pour tous les mélanges. La seule variable est la teneur et la finesse des ajouts minéraux. La détermination du dosage optimum en superplastifiant a été effectuée sur un mortier de référence (sans ajouts) en se basant sur deux essais (relatés en chapitre 3) ; l'essai d'étalement au mini cône et l'essai à l'entonnoir en V. Il est à noter que le dosage optimal en superplastifiant obtenu à partir de ces essais est fixé pour toutes les compositions de mortiers.

4.2.1. Effet du superplastifiant sur l'étalement au mini-cône

Les valeurs d'étalement de chaque composition sont regroupées dans le tableau 4.1 et illustrées sur la figure 4.1. Chaque valeur est une moyenne des résultats obtenus sur trois essais. Les dosages en superplastifiants de 1,4 et 1,5 % ont donné des valeurs d'étalement comprises à l'intérieur de l'intervalle proposé par Domone et al. [200] dont les valeurs

doivent être limitées par 270 et 330 mm. En effet, les diamètres d'étalement sont égaux à 277 et 296,5 mm respectivement. Cependant, les autres dosages en superplastifiants sont rejetés car ils correspondent à des valeurs d'étalement non comprises à l'intérieur de l'intervalle recommandé. De plus, une teneur de 1,8% a présenté un ressuage important dans la galette de mortier autoplaçant.

Tableau 4.1: Variation de l'étalement en fonction du dosage en superplastifiant.

Teneur en superplastifiant (%)	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8
Etalement (mm)	164,0	277,0	296,5	335,5	340,5
Observation	Mortier ferme	Mortier homogène	Mortier homogène	Mortier homogène	Apparition de ressuage

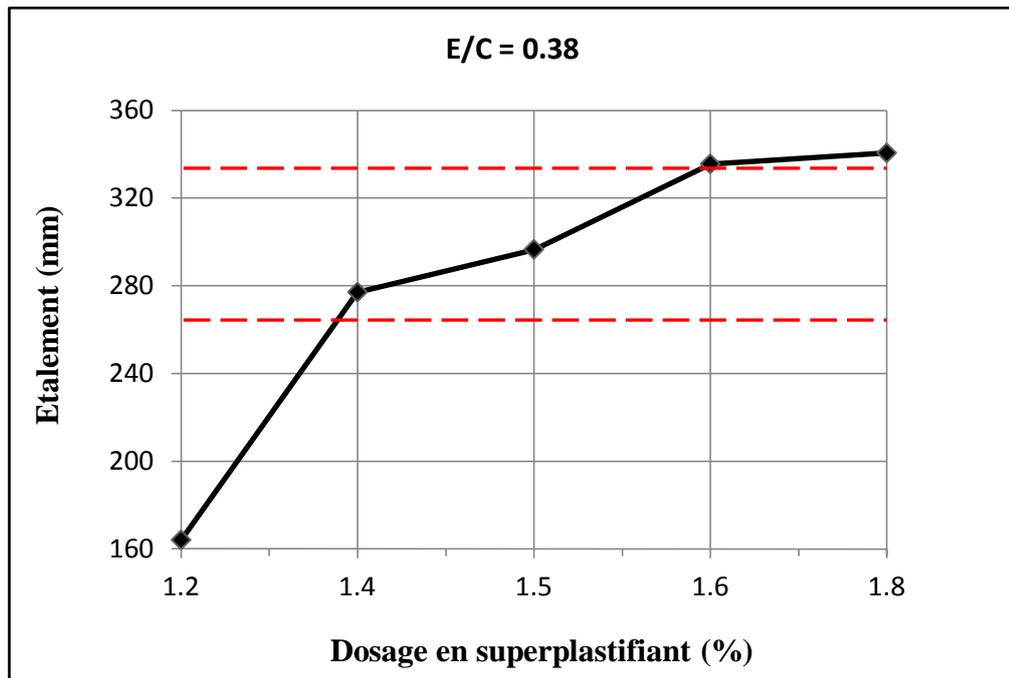


Figure 4.1: Variation de l'étalement en fonction de la teneur en superplastifiant.

4.2.2. Effet du superplastifiant sur le temps d'écoulement (V-Funnel)

Les résultats du temps d'écoulement à l'entonnoir des compositions étudiées sont répertoriés dans le tableau 4.2 et représenté sur la figure 4.2. Toutes les compositions de

mortiers autoplaçants formulées avec les différents dosages en superplastifiants de 1,2% à 1,8 % ont présenté des temps d'écoulement compris à l'intérieur de l'intervalle proposé par Domone et al. [200] borné par une limite inférieure et supérieure de 2s et 10 s respectivement. En effet, les valeurs varient de 8,74 s à 2,50 s pour des teneurs en superplastifiant de 1,2% et 1,8% respectivement.

Tableau 4.2: Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant.

Teneur en superplastifiant (%)	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8
Temps d'écoulement (s)	8,74	4,69	2,52	2,66	2,50

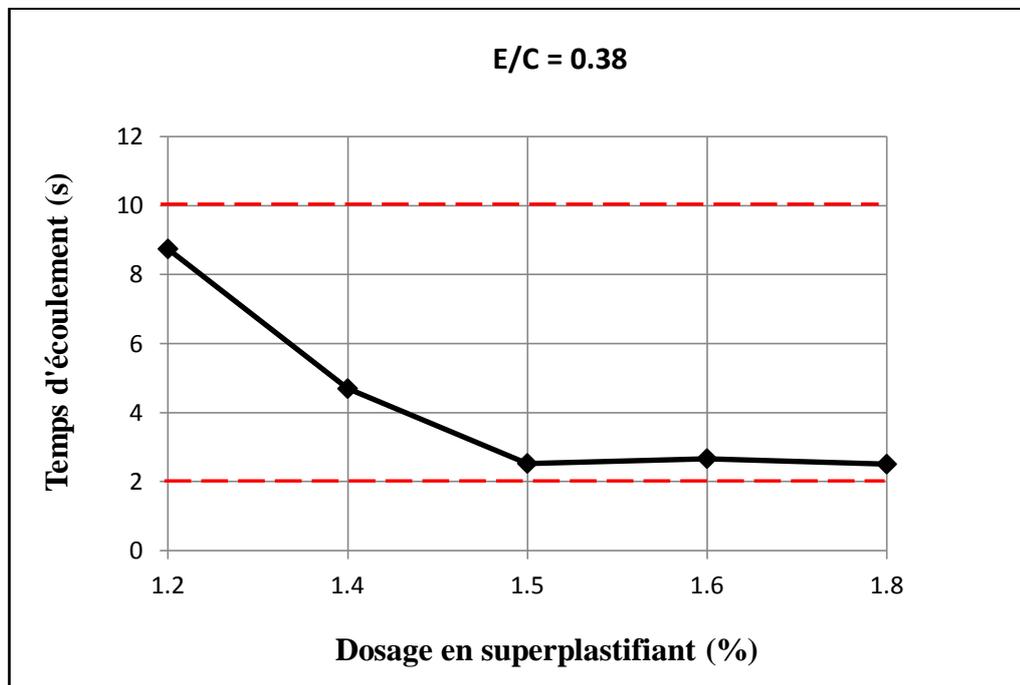


Figure 4.2: Variation du temps d'écoulement en fonction de la teneur en superplastifiant.

En se basant sur les deux essais relatifs au mortier, on peut conclure que le dosage optimal en superplastifiant est de 1,5 %. Ce pourcentage est retenu pour l'ensemble des compositions de MAP (confectionnées à base d'additions minérales). Il a été rapporté par plusieurs recherches que les propriétés des BAP et MAP sont considérablement

influencées par la nature et le dosage de l'addition minérale. Notre travail porte essentiellement sur l'effet de la teneur et la finesse du laitier et de la pouzzolane naturelle sur les propriétés des MAP. Pour garder comme seules variables : la nature, la teneur et la finesse de l'ajout, tous les mélanges ont été formulés avec des matériaux (sable, ciment, adjuvant) identiques. Les rapports S/M, E/L et Sp_{opti} (Tableau 4.3) sont maintenus constant pour toutes les compositions de mortiers étudiées.

Tableau 4.3: Optimisation des mortiers étudiés.

S/M	E/L	$Sp_{optimum}$ (%)
0,5	0,38	1,5

4.3. Influence des additions minérales sur l'ouvrabilité des MAP

Il s'agit d'étudier l'effet du taux de substitution et la variation de la surface spécifique des additions minérales sur les propriétés d'ouvrabilité des mortiers à travers des essais particuliers aux MAP conformément aux recommandations AFGC [3]. Le tableau 4.4 résume la composition des mortiers étudiés.

Tableau 4.4: Composition des mortiers étudiés.

Compositions		MR	MPN15	MPN30	ML15	ML30
Ciment (kg/m ³)		705,00	603,12	500,00	602,50	498,80
Pouzzolane	(%)	0	15	30	-----	-----
	(kg/m ³)	0	98,12	198,12	-----	-----
Laitier	(%)	0	-----	-----	15	30
	(kg/m ³)	0	-----	-----	99,40	200,63
Sable (kg)		1253,80	1253,80	1253,80	1253,80	1253,80
Superplastifiant (%)		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Eau/Liant		0,38	0,38	0,38	0,38	0,38

MR : Mortier de référence.

MPN15 : Mortier autoplaçant à base de 15% de pouzzolane naturelle.

ML30 : Mortier autoplaçant à base de 30% de laitier.

Pour toutes les compositions étudiées, les rapports S/M et E/L ont été fixé à 0,5 et 0,38 respectivement. En s'appuyant sur les résultats d'optimisation obtenus, nous avons opté pour un rapport S_p/L de 1,5. Dans cette étude expérimentale, le ciment est partiellement substitué par laitier et la pouzzolane naturelle à des teneurs de 0%, 15% et 30%.

Les essais de caractérisation de ces mortiers ont été effectués selon les procédures décrites par les guides Européens du BAP [205]. Les résultats expérimentaux d'ouvrabilité des différentes compositions de mortiers autoplaçants sont résumés dans les tableaux 4.5 et 4.6.

4.3.1. Influence de la teneur et la finesse du laitier sur l'ouvrabilité des MAP

Le ciment est substitué par le laitier à des teneurs de 15% et 30%. L'effet de trois finesesses différentes à été étudié. Dans cette étape, le mortier doit présenter un aspect homogène. Les résultats des essais à l'état frais sont présentés dans le tableau 4.5 et illustrés sur les figures 4.3 et 4.5.

Tableau 4.5: Résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers à base de laitier.

Finesse du laitier, SSB (m ² /kg)						
Teneur (%)	350		420		500	
	Etalement (mm)	Temps (s) V-Funnel	Etalement (mm)	Temps (s) V-Funnel	Etalement (mm)	Temps (s) V-Funnel
0	296,5	2,52	296,5	2,52	296,5	2,52
15	299,5	2,43	304,5	2,11	319,5	2,06
30	302,0	5,11	310,5	3,90	321,5	2,58

4.3.1.1. Essai d'étalement au mini-cône

Au regard de la figure 4.3, on constate que les valeurs d'étalement obtenus sont comprises dans l'intervalle défini par Domone et al. [200]. Il est également observé une amélioration de l'étalement des mortiers avec l'accroissement de la teneur en laitier. Cet effet est visible quelque soit la surface spécifique de l'ajout. Cependant, cette observation est beaucoup plus prononcée pour une finesse de 500 m²/kg. A titre d'exemple, pour une finesse de 350 m²/kg, une augmentation des valeurs d'étalement du mortier de 1,0% et 1,8% a été observée pour les mortiers confectionnés avec 15% et 30% respectivement comparé avec celui du mortier à 0% laitier. Pour une finesse de 500 m²/kg, une augmentation d'étalement de 7,75% et 8,43% a été notée pour une substitution de 15% et 30% respectivement. Par ailleurs, nous avons remarqué que tous les mélanges ont présentés un aspect homogène sans l'apparition de ressuage. D'après ces résultats, on peut conclure que l'utilisation du laitier d'El Hadjar dans le mortier permet d'obtenir une meilleure ouvrabilité comparé à celle d'un mortier conventionnel. Ce phénomène peut être expliqué par les caractéristiques de surface des grains de laitier qui permettent un meilleur glissement intergranulaire dans la pâte et au très faible taux d'adsorption d'eau par les grains de laitier au début du malaxage. De plus, d'autres chercheurs [206] ont rapporté que l'activité inerte du laitier, à ce stade de l'hydratation conduit à la libération d'une partie d'eau de gâchage qui va contribuer à la lubrification des grains et à améliorer l'ouvrabilité. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Tangadagi et al. [207], où il a été confirmé qu'une amélioration des valeurs d'étalement est observée avec l'augmentation du pourcentage de laitier dans les compositions de BAP. Les auteurs ont expliqué ce phénomène par le fait d'utilisation d'ultra fines particules de laitier provoque moins de friction interne améliorant ainsi les propriétés des bétons à l'état frais. Zhao et al. [127] ont également étudié l'effet du laitier sur les propriétés des BAP. Leurs résultats ont montré que les valeurs d'étalement s'améliorent avec l'augmentation du taux de substitution de l'addition. Une augmentation de 3,02%, 5,04%, 7,19% a été enregistrée, en comparaison avec le BAP témoin Cela a été attribué à la forme sphérique du laitier conduisant à la réduction des frictions entre les composants solides du béton dans la phase liquide. Une autre recherche [208] a confirmé que pour atteindre une maniabilité maximale, le ciment doit être substitué par 20% à 30 % de laitier. Boukendakdji et al. [55, 209] ont également observé que l'incorporation du laitier dans les compositions de bétons est bénéfique sur le plan ouvrabilité.

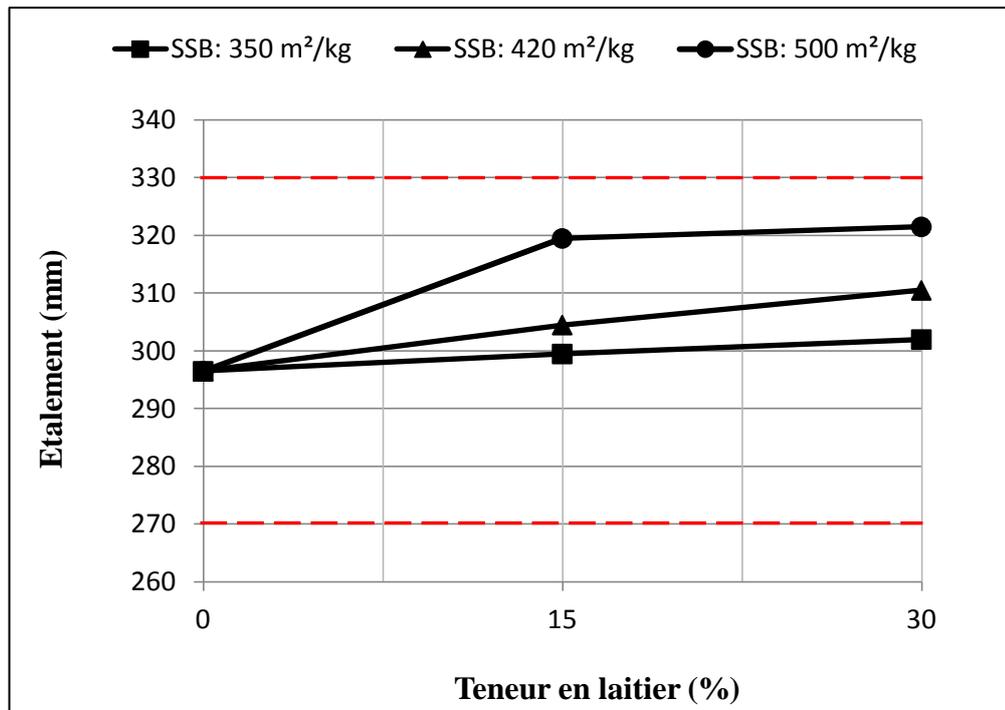


Figure 4.3: Variation de l'étalement des MAP à base de laitier avec différentes finesses.

En effet, il a été constaté qu'une teneur allant jusqu'à 20% de laitier améliore l'étalement des BAP. Cependant, les auteurs ont conclu qu'une substitution supérieure à 20% de laitier conduit à l'augmentation des risques de ségrégation [55]. Les travaux de Wang et Lin [64] ont aussi prouvé que l'addition de laitier comme substitution de ciment améliore les propriétés à l'état frais. En effet, les auteurs ont montré que l'étalement des BAP s'améliore avec l'introduction du laitier avec une teneur optimale de 15%. Par ailleurs, Olatokunbo et al. [59] ont démontré que l'introduction du laitier en raison de 10% améliore l'étalement des BAP. Cependant, pour des valeurs supérieures allant à 20% et 30%, les auteurs ont noté une diminution de l'étalement proportionnellement aux taux de substitution. Kouider Djelloul et al. [103] ont étudié l'ouvrabilité du béton autoplaçant au laitier des hauts fourneaux en modifiant le taux de substitution et ont observé que l'ouvrabilité augmente en présence de laitier avec une teneur optimal de 15% sans l'apparition de problèmes de ségrégation et de ressuage.

Les résultats obtenus montrent également que l'augmentation de la finesse du laitier conduit à une amélioration de l'étalement moyen des mortiers. En effet, pour une substitution de 30%, l'accroissement de la finesse du laitier de 350 m²/kg à 420 m²/kg ou 500 m²/kg présente, respectivement, une amélioration de l'étalement de l'ordre de 2,8% et

6,5%. Cette amélioration de l'ouvrabilité avec l'augmentation de la finesse du laitier peut être attribuée au remplissage des vides par les particules de laitier dans le mélange pour des finesses élevées limitant ainsi l'hydratation du ciment. Des travaux menés par Bessa [210] sur l'effet des additions minérales sur les propriétés mécaniques et de durabilité des mortiers ont montré que le besoin des mortiers en adjuvant dépend en premier lieu de la finesse de l'addition incorporée, indépendamment du type de ciment. Les travaux d'Oner et al. [86] ont montré une diminution de la consistance normale des pâtes de ciment contenant du laitier de surface spécifique élevée de l'ordre de $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ou $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ par rapport à celle contenant du laitier d'une finesse de $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$. Par ailleurs, Kouider Djelloul et al. [87] ont étudié l'effet du laitier sur les propriétés des BAP à l'état frais et ont constaté que l'augmentation de la surface spécifique de l'addition entraîne une diminution des valeurs d'étalement. Ce comportement a été expliqué par une forte consommation d'eau par les grains de laitier de grande surface spécifique. Une autre recherche a été conduite afin d'étudier les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment en introduisant des particules fines de laitier. Il a été constaté que le taux de perte de fluidité d'une pâte contenant du laitier ultrafin est élevé par rapport à la pâte contenant la même quantité de cet ajout d'une finesse ordinaire [211].

4.3.1.2. Essai d'écoulement au V-Funnel

L'effet du taux de substitution ainsi que l'influence de la finesse du laitier sur la variation du temps d'écoulement à l'entonnoir en V des MAP étudiés sont illustrés sur la figure 4.4. Tous les temps d'écoulement obtenus sont inclus dans l'intervalle recommandé par Domone et al. [200] qui définit les limites supérieure et inférieure de 2 à 10 secondes respectivement. Par ailleurs, les résultats indiquent clairement que l'incorporation du laitier en raison de 15% dans les mélanges de mortier provoque une diminution du temps d'écoulement. Cet effet a été observé pour les trois finesses étudiées. Une diminution du temps d'écoulement de 2,52 s à 2,06 s a été enregistrée pour une finesse de $500 \text{ m}^2/\text{kg}$. En revanche, une teneur de 15% de laitier correspond au temps d'écoulement optimum. En effet, nous avons remarqué que l'augmentation de la teneur en laitier à 30% engendre une augmentation du temps d'écoulement.

Ces résultats sont en parfaite concordance avec ceux exposés par Tangadagi et al. [207]. En effet, les auteurs ont conclu que l'augmentation de la teneur de substitution du ciment par le

laitier réduit le temps d'écoulement améliorant ainsi la capacité de remplissage. Ceci a été expliqué par la diminution des frictions internes entre les constituants du béton. De même, Boukendakdji et al. [55] affirment que la substitution jusqu'à 15% de laitier réduit les valeurs du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) quelque soit le type de superplastifiant utilisé. Cependant, les travaux d'Olatokunbo et al. [59] montrent que l'augmentation du pourcentage de laitier de 10% à 20% ou 30% dans les compositions de BAP provoque une légère augmentation du temps d'écoulement au V-Funnel de 6,52 s à 6,93 s et 7,4 s respectivement.

D'autre part, on peut constater que l'augmentation de la finesse du laitier fait diminuer le temps d'écoulement au V-Funnel. Pour un taux de substitution de 30% de laitier, le temps d'écoulement se réduit de 23,7% et 49,5% pour les mortiers confectionnés à base de laitier d'une finesse de 420 m²/kg et 500 m²/kg respectivement comparé à celui d'une finesse de 350 m²/kg.

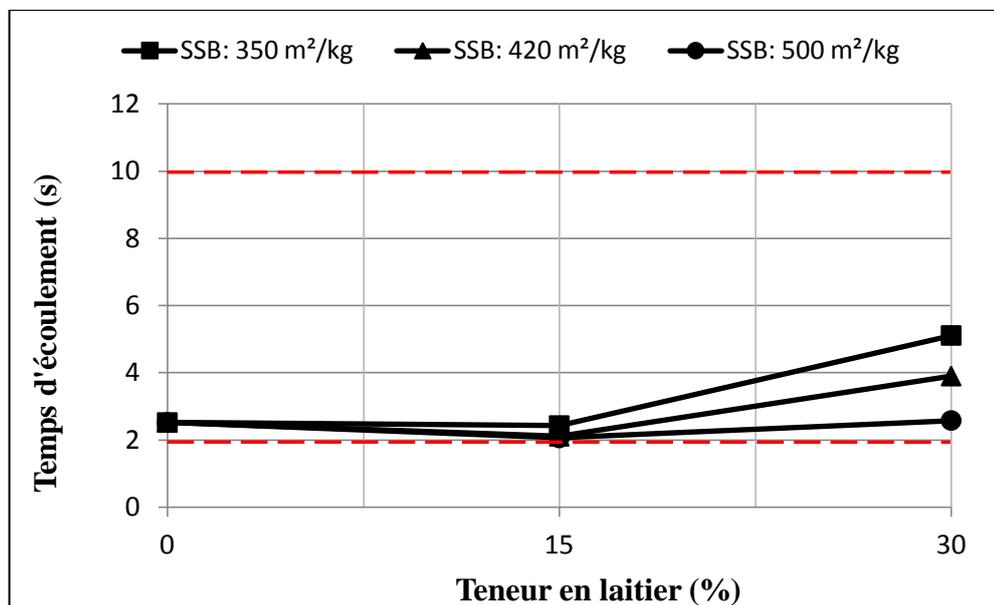


Figure 4.4: Variation du temps d'écoulement des MAP à base de laitier avec différentes finesses.

4.3.2. Influence de la teneur et la finesse de la pouzzolane naturelle sur l'ouvrabilité des MAP

Deux essais relatifs au mortier ont permis d'analyser l'effet de la teneur de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle ainsi que l'effet de la variation de la finesse de

l'addition sur les propriétés des mortiers autoplaçants à l'état frais. Le tableau 4.6 récapitule les résultats de l'essai d'étalement au mini-cône et l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V.

Tableau 4.6: Résultats des essais d'ouvrabilité des mortiers à base de pouzzolane.

Finesse de la pouzzolane, SSB (m ² /kg)						
Teneur (%)	350		420		500	
	Etalement (mm)	Temps (s) V-Funnel	Etalement (mm)	Temps (s) V-Funnel	Etalement (mm)	Temps (s) V-Funnel
0	296,5	2,52	296,5	2,52	296,5	2,52
15	296,0	3,65	283,5	3,86	279,0	4,88
30	281,5	4,20	278,0	4,25	273,0	9,93

4.3.2.1. Essai d'étalement au mini-cône

La variation de l'étalement des mortiers en fonction de leur composition est présentée dans la figure 4.5. On peut observer que les valeurs d'étalement diminuent avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane ; cette variation est notée pour les trois finesses étudiées. Pour une finesse de 420 m²/kg, la substitution du ciment par 15% et 30% de pouzzolane naturelle engendre un étalement de l'ordre de 95,6% et 93,7% de celui du mortier contrôle respectivement. Cette réduction de la maniabilité peut être attribuée à la forte demande en eau des particules de pouzzolane naturelle. Ce résultat est similaire à celui trouvé par Belaidi et al. [43], où il a été confirmé que l'ajout de 20% et 25% de pouzzolane provoque une chute de l'étalement des mortiers. Cette diminution est plus remarquable pour un taux de substitution de 25%. Une autre recherche [44] a révélé que le diamètre d'étalement des BAP diminue de 729 mm pour le BAP témoin à 625 mm pour une teneur de substitution en pouzzolane de 20%. Le même comportement de la pouzzolane naturelle a été observé par Debbih et al. [212] où l'auteur a confirmé que cette addition affecte les propriétés à l'état frais des compositions de BAP. En effet, une diminution des valeurs d'étalement a été constatée en comparaison avec un béton de

référence. Egalement, il a été rapporté que la pouzzolane naturelle améliore la résistance à la ségrégation et la stabilité des mélanges de BAP [212].

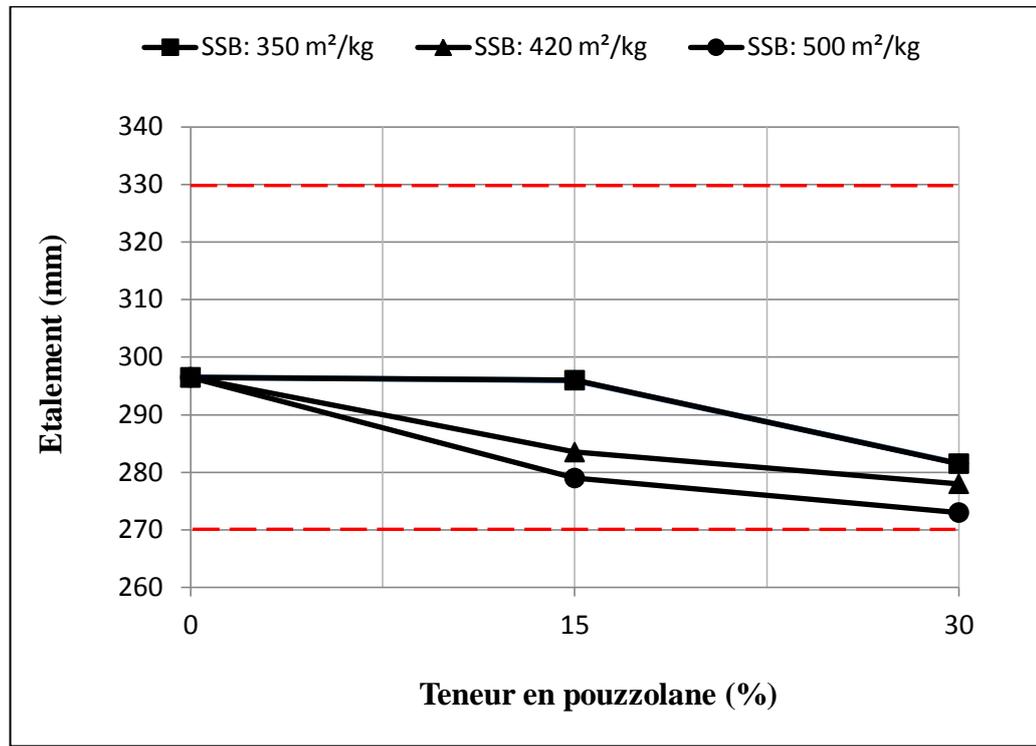


Figure 4.5: Variation de l'étalement des MAP à base de pouzzolane avec différentes finesses.

Il est clair aussi que la finesse de la pouzzolane influe légèrement l'ouvrabilité. En effet, on peut constater que l'augmentation de la surface spécifique de la pouzzolane conduit à une diminution de l'étalement du mortier. A titre d'exemple, pour un taux de substitution de 30%, on enregistre une diminution de l'étalement de l'ordre 1,2% et 3,0% pour les mortiers confectionnés à base de pouzzolane naturelle d'une finesse de 420 m²/kg et 500 m²/kg respectivement en comparaison à celui contenant de la pouzzolane broyée à 350 m²/kg. Il est à noter que tous les mortiers étudiés ont présenté un aspect homogène (sans ressuage) quelque soit les pourcentages de substitution et les finesses de mouture de la pouzzolane naturelle.

4.3.2.2. Essai d'écoulement au V-Funnel

L'influence de la pouzzolane sur le temps d'écoulement au V-Funnel est présentée sur la figure 4.6. En analysant ces résultats, on observe une augmentation du temps d'écoulement

avec l'accroissement de la teneur en pouzzolane quelque que soit la surface spécifique de cette dernière. En effet, pour une finesse de $350 \text{ m}^2/\text{kg}$, l'augmentation du taux de substitution du ciment de 0% à 15% ou 30% de pouzzolane conduit à un temps d'écoulement supérieur de 44,8% et 66,6% comparé à celui du mortier témoin. Ces résultats s'accordent avec ceux trouvés par Omrane et al. [44] où l'accroissement de la teneur en pouzzolane provoque une augmentation du temps d'écoulement à l'entonnoir en V. Une teneur maximale d'addition de 15 % a été notée pour le BAP à base des granulats naturels et jusqu'à 20% de pouzzolane pour les BAP à base de granulats recyclés pour avoir un temps d'écoulement compris dans l'intervalle recommandé. Des observations similaires ont été indiquées par Belaidi et al. [43]. Cependant, Dada et al. [46] ont observé que l'incorporation de 5% et 10% de pouzzolane réduit le temps d'écoulement des pâtes de ciment. Par contre, l'utilisation de 15% de PZ augmente le temps d'écoulement des mélanges. A partir de cette figure, on peut également constater que plus la pouzzolane est fine plus le temps d'écoulement au V- Funnel est important. A titre d'exemple, pour une substitution de 30%, le temps d'écoulement passe de 4,2s à 4,25s et 9,93s pour des finesses de $350 \text{ m}^2/\text{kg}$, $420 \text{ m}^2/\text{kg}$ et $500 \text{ m}^2/\text{kg}$ respectivement.

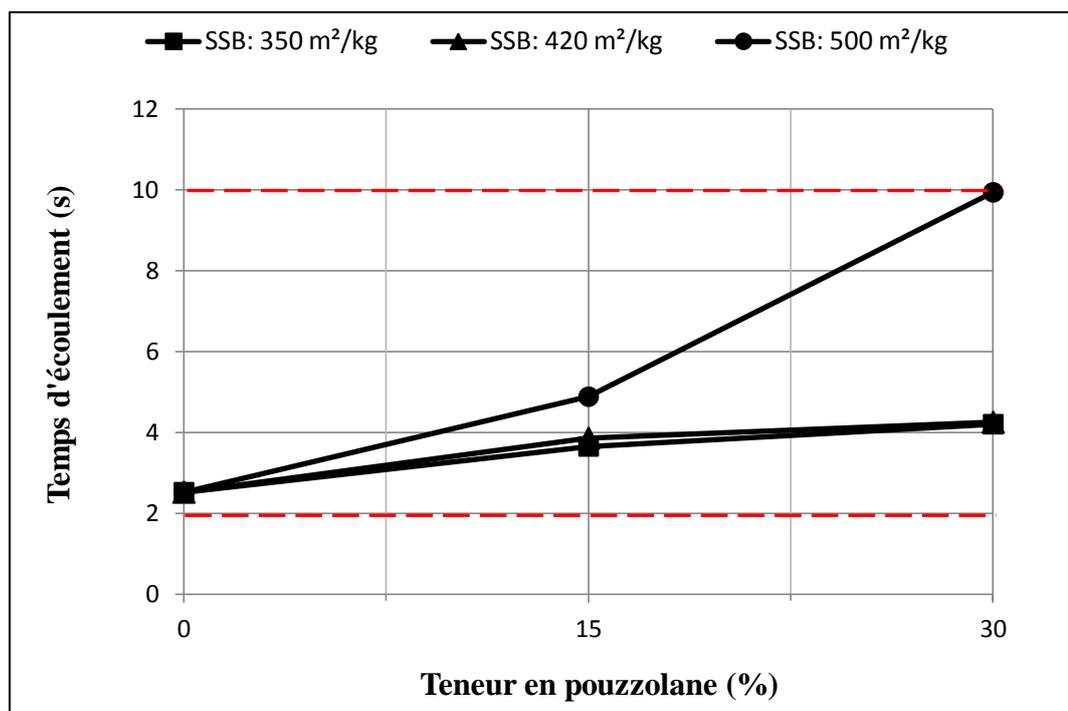


Figure 4.6: Variation du temps d'écoulement des MAP à base de pouzzolane avec différentes finesses.

4.4. Influence des additions minérales sur les paramètres rhéologiques des MAP

4.4.1. Influence de la teneur et la finesse du laitier sur la viscosité et le seuil de cisaillement

Les résultats des paramètres rhéologiques, en fonction du taux de substitution et la variation de la finesse du laitier, sont consignés dans le tableau 4.7 et représentées sur les figures 4.7 et 4.8.

Tableau 4.7: Valeurs de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement en fonction de la teneur et la finesse du laitier.

Finesse du laitier, SSB (m²/kg)						
Teneur en laitier (%)	350		420		500	
	Viscosité plastique (Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)	Viscosité plastique (Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)	Viscosité plastique (Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)
0	6,08	19,11	6,08	19,11	6,08	19,11
15	4,73	17,70	4,03	14,60	2,89	12,31
30	4,65	17,23	3,23	12,66	2,06	9,80

A partir des résultats illustrés sur la figure 4.7, il est clair que la valeur de la viscosité plastique des mortiers autoplaçants diminue avec l'augmentation du taux de substitution du laitier. Cette observation a été notée quel que soit la finesse de l'addition. A titre d'exemple, pour une finesse de 350 m²/kg, la viscosité plastique des MAP au laitier est réduite de 6,08 Pa.s à 4,73 Pa.s et 4,65 Pa.s pour une substitution de 15% et 30% respectivement. Cette réduction est plus remarquable pour des surfaces spécifiques plus élevées. En effet, pour une finesse de 500 m²/kg, la viscosité baisse de 6.08 Pa.s à 2,89 Pa.s et 2,06 Pa.s. La faible activité chimique de cette addition, au très jeune âge, leur confère un effet filler important qui est responsable de cette amélioration de la viscosité [26].

D'autre part, la figure 4.8 montre que pour les mortiers comportant du laitier, une réduction du seuil de cisaillement en fonction de l'augmentation du taux de substitution est observée. Pour une finesse de laitier de 500 m²/kg, les valeurs du seuil de cisaillement diminuent de 19,11 Pa à 12,31 Pa et 9,8 Pa pour un taux de remplacement de 0%, 15% et

30% respectivement. Yahyaoui et al. [73] ont étudié l'effet du laitier sur la variation des paramètres rhéologiques des BAP. Ils ont trouvé que la viscosité et le seuil de cisaillement d'un BAP diminue avec l'incorporation de laitier. Cependant, des travaux menés par Zhou et al. [211] sur l'influence du laitier sur l'évolution de la chaleur d'hydratation et des propriétés rhéologiques de pâtes de ciment ont exhibé que l'ajout de laitier finement broyé a un effet néfaste sur le comportement rhéologique de la pâte de ciment. En effet, il a été montré que la viscosité plastique et le seuil de cisaillement de la pâte augmentent de manière significative avec l'augmentation de la teneur en laitier.

D'après les résultats obtenus, on peut également observer une décroissance des valeurs de la viscosité et du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la finesse du laitier. En effet, pour un taux de substitution de 30%, une diminution de la viscosité de 4,65 Pa.s à 3,23 Pa.s et 2,06 Pa.s a été notée pour des finesses de laitier de 350 m²/kg, 420 m²/kg et 500 m²/kg respectivement. Le même effet a été observé pour le seuil de cisaillement où le laitier provoque une diminution significative de 17,23 Pa à 12,66 Pa et 9,8 Pa pour des finesses de mouture de laitier de 350 m²/kg, 420 m²/kg et 500 m²/kg respectivement. On peut conclure de la figure 4.9, qu'il existe une bonne corrélation entre la viscosité plastique et l'étalement des mortiers quelque soit la finesse du laitier, montrant une augmentation de l'étalement avec la diminution de la viscosité des MAP.

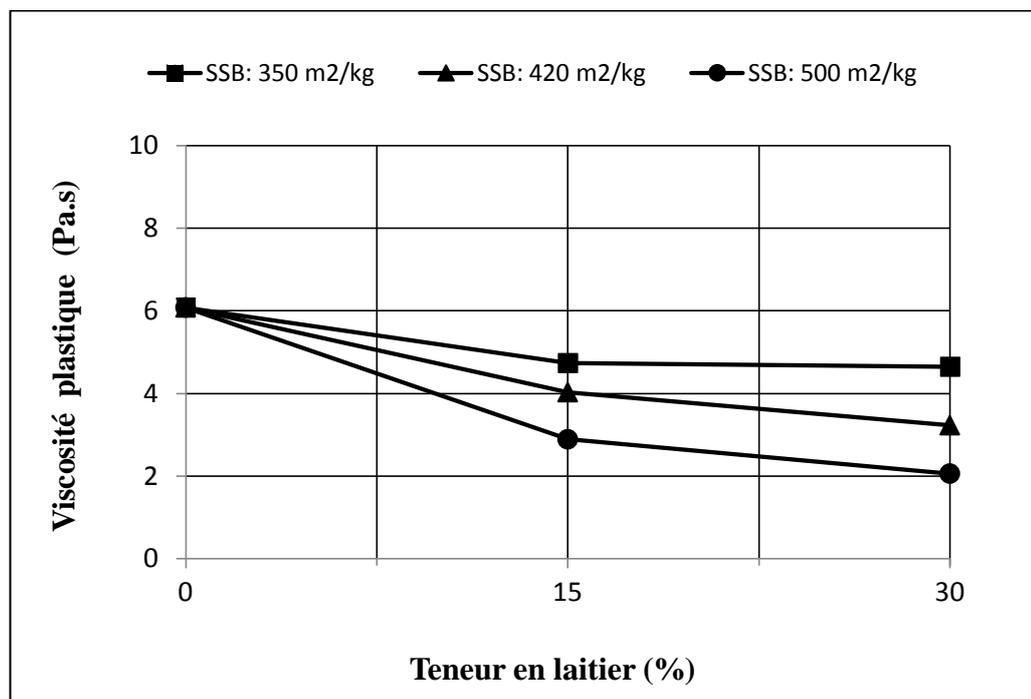


Figure 4.7: Influence de la teneur et la finesse du laitier sur la viscosité plastique des MAP.

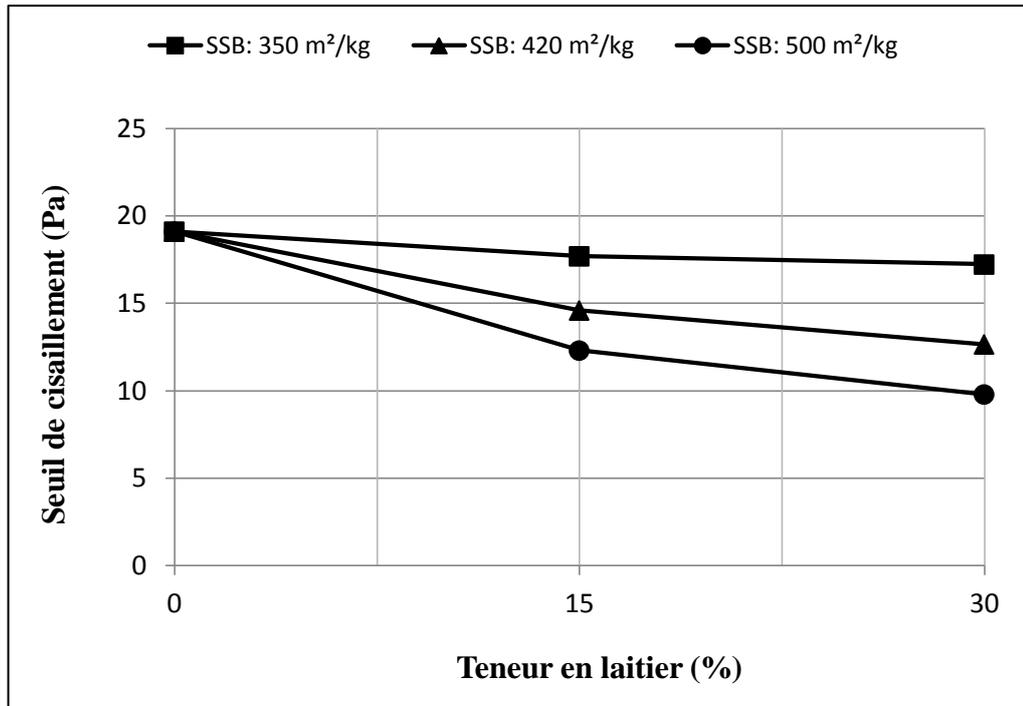


Figure 4.8: Influence de la teneur et la finesse du laitier sur le seuil de cisaillement des MAP.

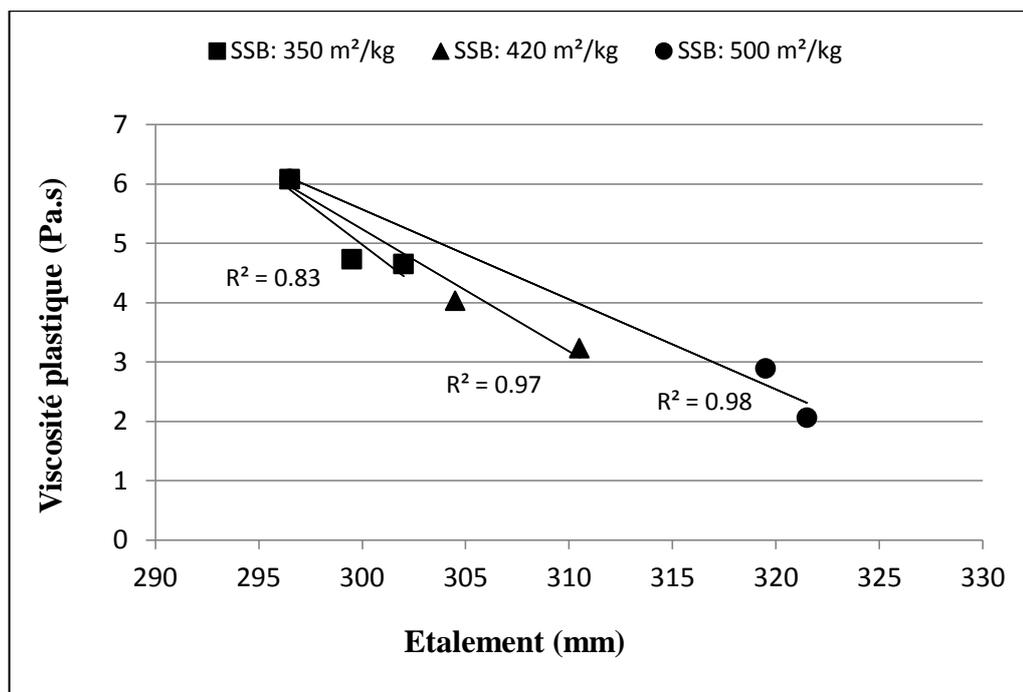


Figure 4.9: Corrélation entre la viscosité et l'étalement des MAP au laitier avec différentes finesses.

Les coefficients de corrélation sont très proches de l'unité et sont égaux à 0,83, 0,97 et 0,98 pour une finesse de 350 m²/kg, 420 m²/kg et 500 m²/kg, respectivement.

4.4.2. Influence de la teneur et la finesse de la pouzzolane naturelle sur la viscosité plastique et le seuil de cisaillement des MAP

La variation de la viscosité et du seuil de cisaillement en fonction du taux de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle à différentes finesses et donnée par le tableau 4.8 et montrée sur les figures 4.10 et 4.11 respectivement. A partir des résultats illustrés sur la figure 4.10, on peut constater que les mortiers, comportant de la pouzzolane naturelle, possèdent une viscosité plastique accrue avec le taux de substitution. Cette addition est caractérisée par une grande demande en eau, ce qui influe négativement sur la valeur de la viscosité. Cet effet est beaucoup plus significatif pour une finesse de 500 m²/kg, où les valeurs de la viscosité plastique sont égales à 6,08 Pa.s, 11,23 Pa.s et 14,06 Pa.s pour une substitution de 0%, 15% et 30%, respectivement. D'autre part, la figure 4.11 montre que la valeur du seuil de cisaillement des MAP augmente d'une manière significative avec l'augmentation du taux de substitution de l'addition. Pour une surface spécifique de 500 m²/kg, des valeurs de 19,11 Pa, 26,2 Pa et 30,7 Pa ont été enregistrées pour un remplacement de 0%, 15% et 30%, respectivement. Ce résultat est similaire à celui trouvé par Kesseir et al. [213], où l'accroissement de la teneur en pouzzolane naturelle provoque une augmentation de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement des mortiers quelque soit le rapport E/L. Egalement, Boukhelkhal et al. [214] ont affirmé que la pouzzolane naturelle rend le BAP plus visqueux par rapport à celui fabriqué avec du filler calcaire ou du laitier granulé.

Tableau 4.8: Valeurs de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement en fonction de la teneur et la finesse de la pouzzolane naturelle.

Finesse de la pouzzolane naturelle, SSB (m ² /kg)						
	350		420		500	
Teneur en pouzzolane (%)	Viscosité plastique (Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)	Viscosité plastique (Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)	Viscosité plastique (Pa.s)	Seuil de cisaillement (Pa)
0	6,08	19,11	6,08	19,11	6,08	19,11
15	6,42	20,18	8,31	21,70	11,23	26,20
30	6,71	21,09	9,22	23,31	14,06	30,70

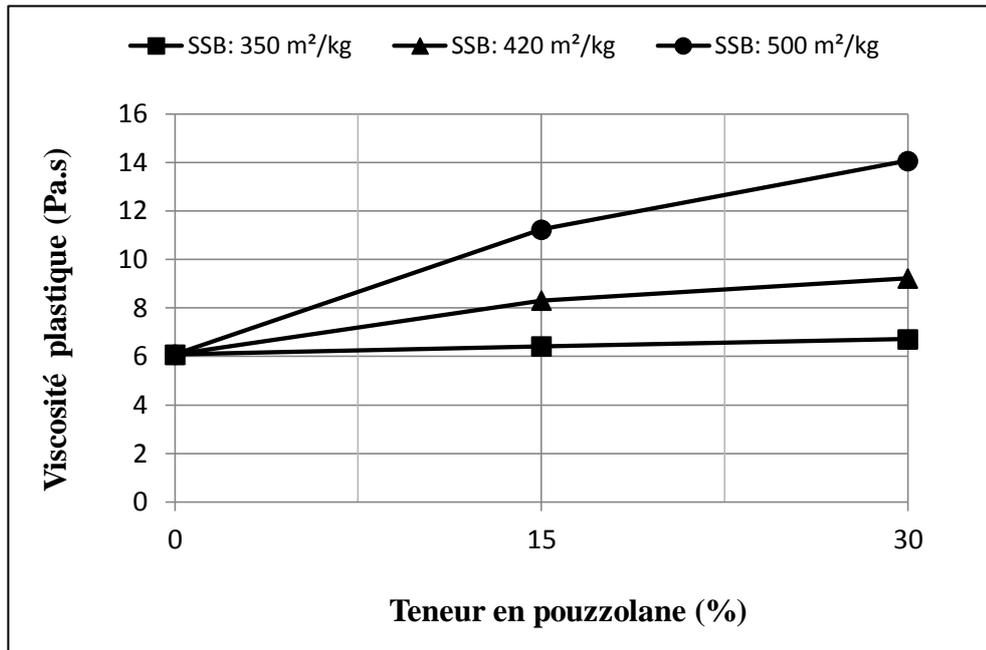


Figure 4.10: Influence de la teneur et la finesse de la pouzzolane naturelle sur la viscosité plastique des MAP.

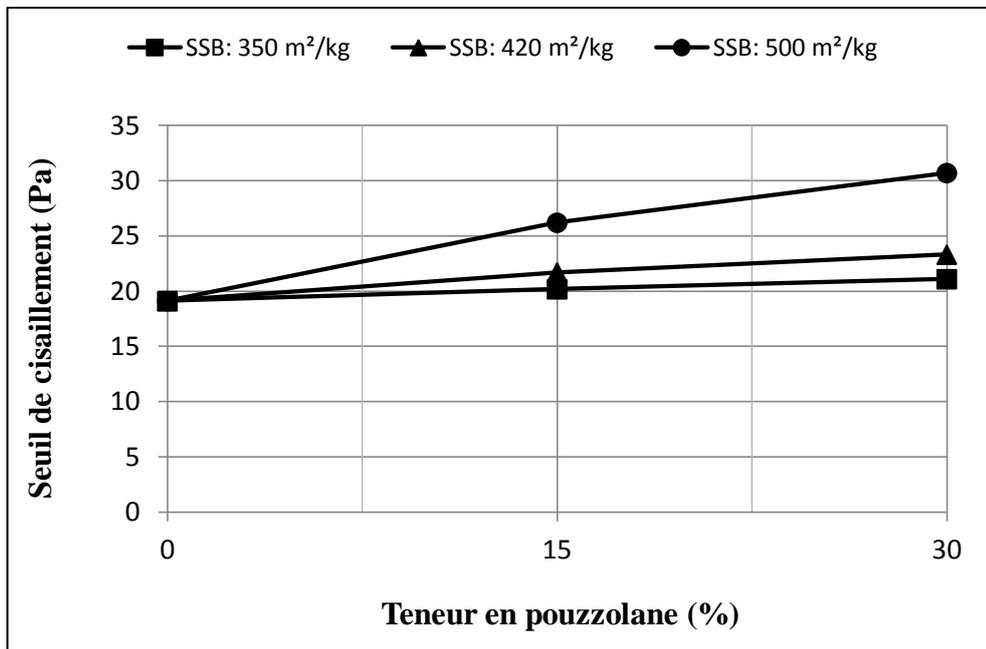


Figure 4.11: Influence de la teneur et la finesse de la pouzzolane naturelle sur le seuil de cisaillement des MAP.

D'après la littérature, La pouzzolane naturelle a un comportement rhéologique comparable à celui de la fumée de silice en raison des interactions accrues entre les particules fines [215]. Une substitution partielle du ciment par la pouzzolane naturelle entraîne une augmentation de la cohésion, elle rend donc les mélanges moins fluides [215].

Les résultats montrent aussi que l'augmentation de la surface spécifique de la pouzzolane naturelle a un effet sur le développement des paramètres rhéologiques des MAP. A titre d'exemple, pour une substitution de 30%, l'augmentation de la surface spécifique de 350 m²/kg à 420 m²/kg ou 500 m²/kg provoque un accroissement de la viscosité plastique de 6,71 Pa.s à 9,22 Pa.s et 14,06 Pa.s, respectivement. La même observation a été notée pour le seuil de cisaillement. En effet, on a constaté que plus la pouzzolane est fine, plus le seuil de cisaillement est important. Pour une incorporation de 30% de pouzzolane naturelle, la valeur du seuil de cisaillement correspond à 21,09 Pa, 23,31 Pa et 30,70 Pa pour des finesses de moutures de 350 m²/kg, 420 m²/kg et 500 m²/kg respectivement.

La figure 4.12 présente les valeurs expérimentales de la viscosité plastique en fonction de l'étalement des MAP à la pouzzolane naturelle. Une bonne corrélation linéaire est observée entre les deux paramètres avec un coefficient de corrélation, R^2 de 1,0 pour les deux finesses de l'addition 350 m²/kg et 420 m²/kg, montrant une diminution de l'étalement avec l'augmentation de la viscosité plastique.

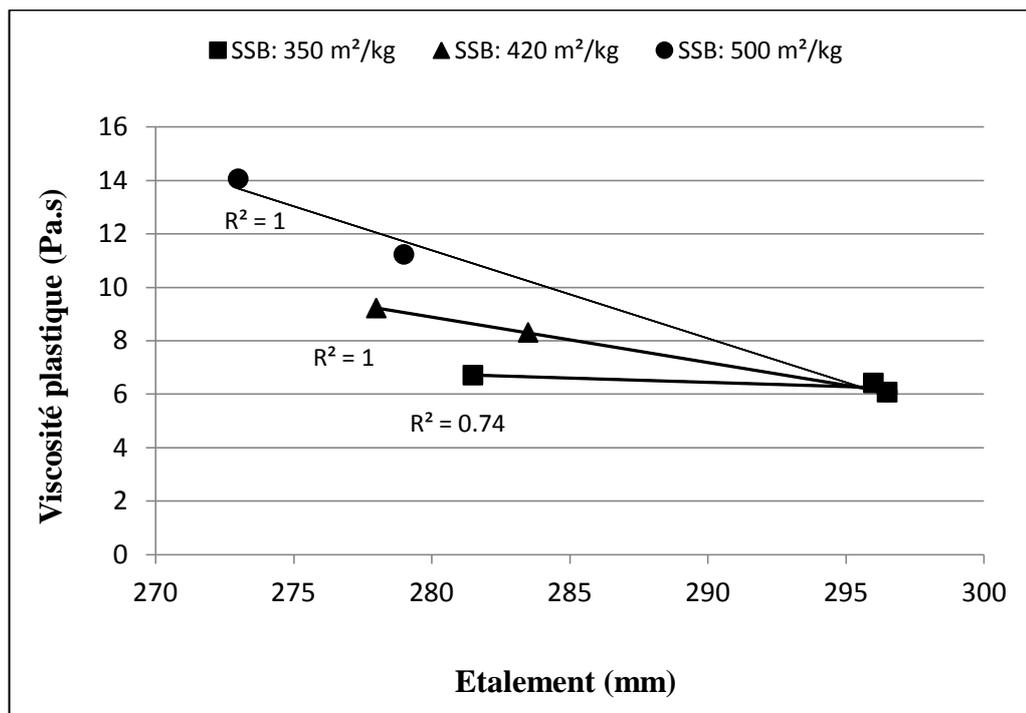


Figure 4.12: Corrélation entre la viscosité et l'étalement des MAP à la pouzzolane naturelle avec différentes finesses.

4.5. Influence des additions minérales sur la résistance en compression des MAP

4.5.1. Influence du laitier sur le développement de la résistance en compression

Après la confection des éprouvettes de mortiers, ces dernières ont été conservées dans un bac d'eau à 20°C, jusqu'à l'échéance de l'essai. De même que pour les éprouvettes confectionnées à base de pouzzolane naturelle, la mesure de la résistance en compression a été effectuée à jeune âge, moyen et à long terme jusqu'à 180 jours. Pour chaque finesse étudiée, le ciment est substitué par 15% et 30% de laitier.

- **Influence du taux de substitution du laitier**

Les variations de la résistance en compression des mortiers au laitier en fonction du pourcentage de substitution pour chaque finesse étudiée sont récapitulées dans le tableau 4.9 et illustrées sur les figures 4.13, 4.14 et 4.15.

Tableau 4.9: Développement de la résistance en compression des MAP à base de laitier.

Résistance moyenne en compression (MPa)							
Finesse du laitier, SSB (m²/kg)							
Age (Jours)	MR	350		420		500	
	Teneur (%)	Teneur (%)		Teneur (%)		Teneur (%)	
	0	15	30	15	30	15	30
1	22,7	18,7	13,0	17,4	11,8	16,8	11,1
7	56,5	51,2	44,0	50,2	41,0	49,1	38,7
28	66,7	64,6	62,1	65,4	61,5	64,1	59,1
56	69,7	69,8	65,1	73,2	72,9	73,8	75,1
90	72,8	75,3	76,1	81,6	77,3	77,8	75,9
180	74,1	78,9	79,3	83,7	79,8	80,8	77,6

Les résultats obtenus montrent que la substitution du ciment par du laitier engendre une baisse linéaire de la résistance en compression des MAP à jeune âge. Cette observation est notée pour les trois finesses du laitier étudiées. Pour les compositions de mortiers contenant 15% et 30% de laitier broyé à 350 m²/kg, la diminution de résistance est de l'ordre de 18 % et 43% à une journée de cure, 9 % et 22 % à l'âge de 7 jours, 3% et 7% à l'âge de 28 jours respectivement comparé au mortier contrôle. Ce résultat peut être expliqué par la faible réactivité des laitiers à jeune âge qui provoque une diminution de la résistance en compression. Une amélioration de la résistance en compression des mortiers au laitier est observée à long terme. En effet, une augmentation de l'ordre de 2 MPa et 3 MPa à 90 jours d'âge, 5 MPa à 180 jours de cure a été observée pour les mortiers contenant 15% et 30% de laitier respectivement (pour une finesse d'addition de 350 m²/kg). Cette augmentation de résistance peut être attribuée à la réactivité du laitier qui se manifeste à long terme causant une densification de la microstructure par la formation des hydrates additionnels [107]. Il a été montré que le laitier est une addition minérale possédant une bonne capacité d'améliorer les performances des bétons à long terme. Il a été rapporté par une autre recherche [216], que la continuation de l'hydratation du laitier à long terme augmente la quantité des gels de C-S-(A)-H responsables d'une forte contribution à améliorer et à densifier la structure poreuse des bétons durcis.

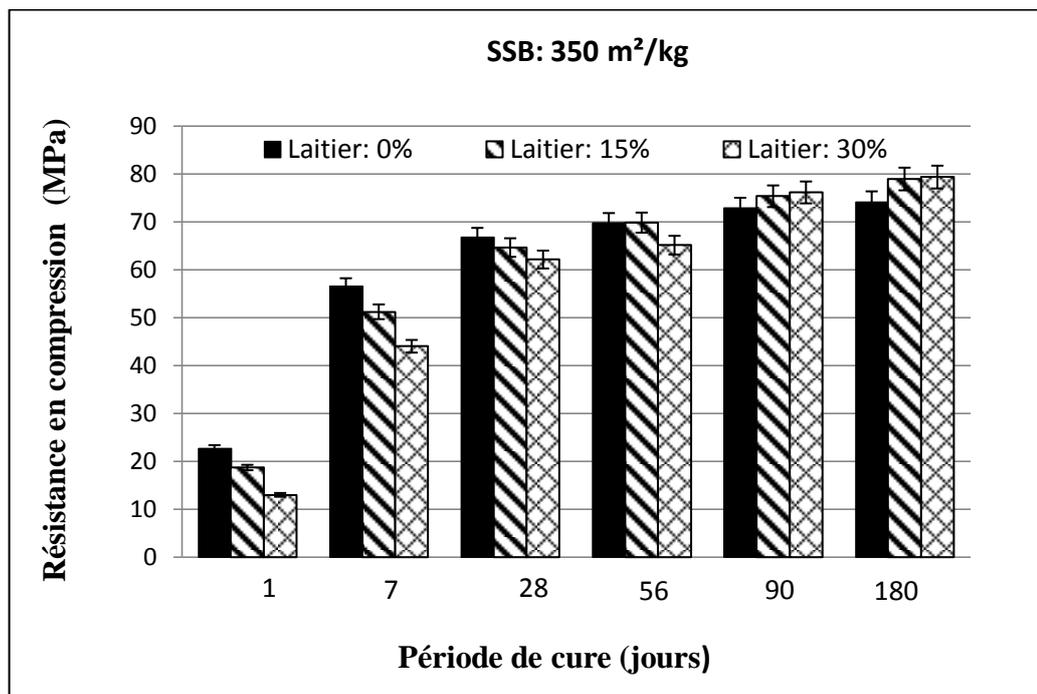


Figure 4.13: Evolution de la résistance en compression des mortiers au laitier (SSB : 350 m²/kg).

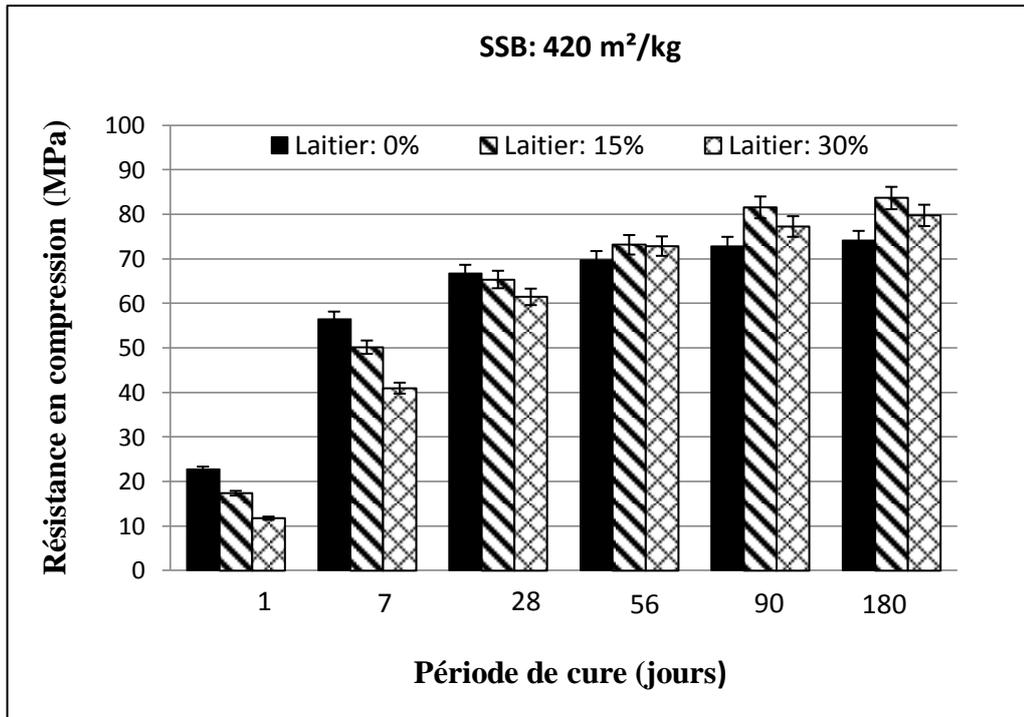


Figure 4.14: Evolution de la résistance en compression des mortiers au laitier (SSB : 420 m²/kg).

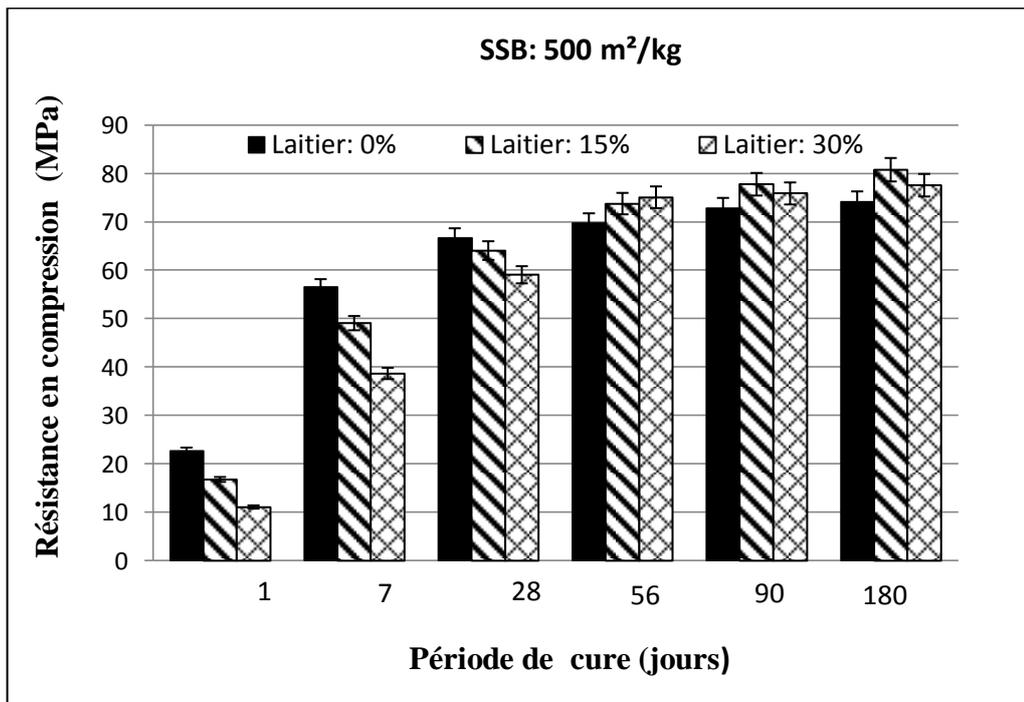


Figure 4.15: Evolution de la résistance en compression des mortiers au laitier (SSB : 500 m²/kg).

La diminution des résistances en compression des MAP à jeune âge apportée par la présence du laitier conforte celle obtenue par Bayat et al. [217] qui ont rapporté que l'ajout

du laitier contribue à diminuer la résistance des mélanges de BAP à tous les âges. Pour les longues échéances de maturation, la réduction des valeurs de résistance est moins importante. À l'âge de 90 jours, le remplacement de 20 %, 30 % et 40 % de laitier engendre une diminution de résistance de l'ordre de 0,7; 0,8 et 2,5 MPa respectivement par rapport au BAP témoin. A 180 jours, sauf pour les compositions à 40% de laitier, tous les mélanges binaires ont connus une amélioration de la résistance en compression. Par ailleurs, Gupta et Siddique [218] ont démontré que les mélanges contenant jusqu'à 60 % de laitier développent une résistance plus élevée par rapport au béton témoin. D'autre part, Sahoo et al. [219] ont constaté une augmentation significative de la résistance à la compression avec l'ajout du laitier. Les auteurs ont attribué ce résultat à la réaction pouzzolanique du laitier avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment. L'augmentation optimale a été atteinte à 20 % de remplacement du laitier. Selon Oluwaseun et al. [220], du point de vue résistance mécanique, la production d'un béton autoplaçant incorporant du laitier comme déchet industriel est réalisable. Ce dernier peut être utilisé comme un ajout alternatif, qui est plus écologique que le ciment Portland. En effet, les auteurs ont affirmé que l'augmentation de la teneur en laitier entraîne une amélioration des propriétés mécaniques des BAP. La résistance maximale a été obtenue pour une teneur de substitution de 20%.

- Influence de la finesse du laitier

L'influence de la finesse du laitier sur le développement des résistances en compression des mortiers autoplaçants est illustrée sur les figures 4.16 et 4.17. D'après ces figures, on peut observer qu'à jeune âge, les compositions de mortiers à base de laitier de différentes surfaces spécifiques présentent des résistances similaires. Cet effet a été observé pour les deux taux de substitution de mortier (15% et 30%). A long terme et pour une substitution de 15%, l'augmentation de la finesse du laitier de 350 m²/kg à 420 m²/kg et 500 m²/kg provoque une augmentation de la résistance en compression de l'ordre de 7 MPa et 4 MPa respectivement (90 jours). Pour un taux plus élevé du laitier (30%), l'effet de la finesse de l'addition est bien observé à partir de 56 jours de cure où une augmentation de résistance est enregistrée avec l'augmentation de la surface spécifique du laitier. Une amélioration de 8 MPa et 10 MPa a été notée pour des surfaces spécifiques de 420 m²/kg et 500 m²/kg comparée aux compositions contenant du laitier d'une finesse de 350 m²/kg. A 180 jours, les résistances sont comparables pour les trois finesses de l'addition. D'après la littérature,

les performances du mortier sont significativement influencées par la surface spécifique du laitier. En effet, il a été rapporté que la composition chimique et la finesse du laitier affectent de manière significative la réactivité du laitier et que la réaction pouzzolanique du laitier augmente avec l'augmentation de sa finesse [120,221].

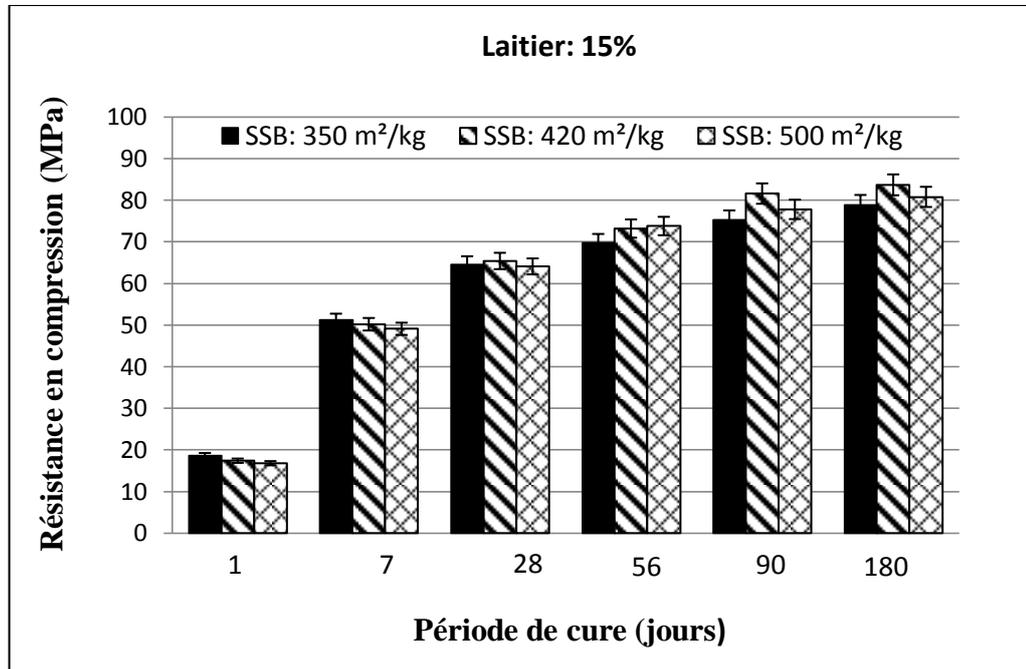


Figure 4.16 : Influence de la finesse du laitier sur l'évolution de la résistance en compression des MAP (Taux de substitution: 15%).

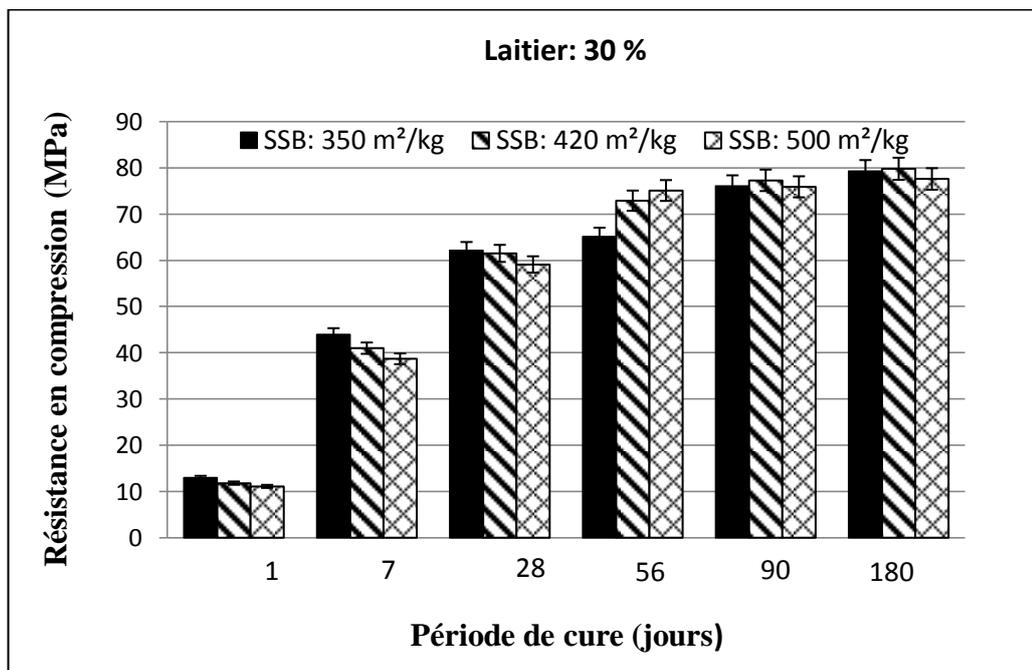


Figure 4.17 : Influence de la finesse du laitier sur l'évolution de la résistance en compression des MAP (Taux de substitution: 30%).

Zhou et zhang [211] ont rapporté qu'à des âges plus avancés, l'augmentation de la finesse du laitier conduit à une meilleure réaction pouzzolanique d'environ 40 à 70 %. De plus, des études complémentaires [222] ont montré que l'augmentation de la finesse du laitier de 400 à 565 m²/kg améliore la résistance en compression des mortiers. Selon Dai et al. [223], l'indice d'activité du laitier augmente avec l'augmentation de sa surface spécifique. En effet, les auteurs ont confirmé que plus le laitier est fin plus la résistance en compression est améliorée. D'autre part, Sevim et Baran [224] ont confirmé que l'effet de la finesse du laitier sur la résistance en compression est généralement plus important à des niveaux élevés de substitution. Cela suggère une amélioration des performances mécaniques des matières cimentaires contenant un pourcentage élevé du laitier d'une finesse importante.

4.5.2. Influence de la pouzzolane naturelle sur le développement de la résistance en compression

Les éprouvettes destinées pour la mesure de la résistance en compression ont été conservées en cure humide à 20°C, jusqu'à 180 jours. Pour chaque finesse étudiée, le ciment est substitué par 15% et 30% de pouzzolane naturelle.

- Influence du taux de substitution de la pouzzolane

Les résultats de la résistance à la compression des mortiers autoplaçants en fonction de la teneur et la finesse de la pouzzolane naturelle sont récapitulés dans le tableau 4.10. Pour chaque finesse étudiée, le développement de la résistance en compression en fonction du pourcentage de substitution de la pouzzolane est illustré sur les figures 4.18, 4.19 et 4.20. A l'issue de ces résultats, on peut observer que l'augmentation des taux de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle engendre une diminution des résistances en compression à 1, 7 et 28 jours de cure. Pour une finesse de 500 m²/kg et pour une substitution de 15%, la diminution de résistance est de l'ordre de 49%, 39% et 6% à 1, 7 et 28 jours respectivement. Ce résultat peut être expliqué par la lente réaction pouzzolanique de la pouzzolane naturelle à jeune âge. Cependant, l'introduction de la pouzzolane naturelle dans les compositions de mortiers autoplaçants a un effet bénéfique sur le développement des résistances en compression à long terme. En effet, l'amélioration de résistance est observée à partir de l'âge de 56 jours pour une finesse de 500 m²/kg et à partir de l'âge de 90 jours pour les finesses de 350 m²/kg et 420 m²/kg. Pour une surface spécifique de 500 m²/kg, la résistance augmente de 6 MPa et 5 MPa environ

respectivement lorsqu'on remplace le ciment par 15% et 30% de pouzzolane naturelle. Ce résultat peut être attribué à la réaction pouzzolanique qui se manifeste à cet âge de conservation. Ce phénomène peut être expliqué par la réaction en présence d'eau de la silice amorphe (SiO_2) présente dans la pouzzolane naturelle avec l'hydroxide de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) produit par l'hydratation du ciment produisant ainsi la formation des C-S-H additionnels conduisant à l'amélioration des résistances des pâtes de ciment [225,226].

Des résultats similaires ont été reportés par Belaidi et al. [43] où ils ont montré que l'introduction de la pouzzolane naturelle provoque une augmentation des résistances à long terme (90 jours). Une résistance maximale a été obtenue pour une substitution de 5% de pouzzolane naturelle dans les compositions binaires. De même, Laakri et al. [227] avaient affirmé dans leur étude sur l'effet de la pouzzolane naturelle sur l'hydratation des ciments que l'analyse DRX a montré une plus grande quantité de C-S-H dans les mélanges avec de la pouzzolane naturelle.

Tableau 4.10: Développement de la résistance en compression des MAP à base de pouzzolane naturelle.

Résistance moyenne en compression (MPa)							
Finesse de la pouzzolane, SSB (m^2/kg)							
Age (Jours)	MR	350		420		500	
	Teneur (%)	Teneur (%)		Teneur (%)		Teneur (%)	
	0	15	30	15	30	15	30
1	22,7	16,6	12,9	12,1	9,5	11,5	9,4
7	56,5	50,7	41,5	46,7	33,4	34,4	36,7
28	66,7	62,2	59,8	59,4	56,4	62,9	59,7
56	69,7	67,4	66,7	67,7	63,5	72,2	69,3
90	72,8	74,9	75,2	76,5	75,4	77,9	77,1
180	74,1	76,6	77,5	79,8	77,9	79,8	79,5

Cette quantité est plus importante lorsque la température augmente. Selon Kesseir et al. [213], aux premiers âges, la résistance à la compression des spécimens contenant de la pouzzolane naturelle est inférieure de 8 % à celle du mortier ordinaire, progressivement, à l'âge de 28 jours, la résistance en compression des éprouvettes contenant de la pouzzolane est relativement augmentée, et de plus elle est significativement accrue à l'âge de 90 jours, pour les deux rapports E/L (0,35 et 0,40). En effet, la résistance augmente de 25 % pour un optimum de 15 % de substitution. Cependant, en se référant aux travaux de Senhadji and al. [98], la substitution du ciment par la pouzzolane naturelle réduit la résistance en compression à jeune âge comparé au mortier contrôle. Selon Debbih et al. [212], l'incorporation de la pouzzolane naturelle affecte négativement la résistance à la compression des BAP à court et à long terme. Une diminution significative a été observée à tous les âges par rapport au béton témoin. Une réduction d'environ 25,6 % à été enregistrée à 90 jours. Cependant, Omrane et al. [44] ont observé dans leurs travaux sur les BAP que la résistance en compression des compositions à base de pouzzolane naturelle est similaire à celle du béton témoin à long terme. Des résultats similaires ont été rapportés par Benyahia et al. [228] où il a été constaté que la résistance en compression des MAP à 20% de pouzzolane naturelle était de l'ordre de 56 MPa à 28 jours de cure avec seulement 3 % de diminution par rapport à celui du mortier témoin (57,6 MPa).

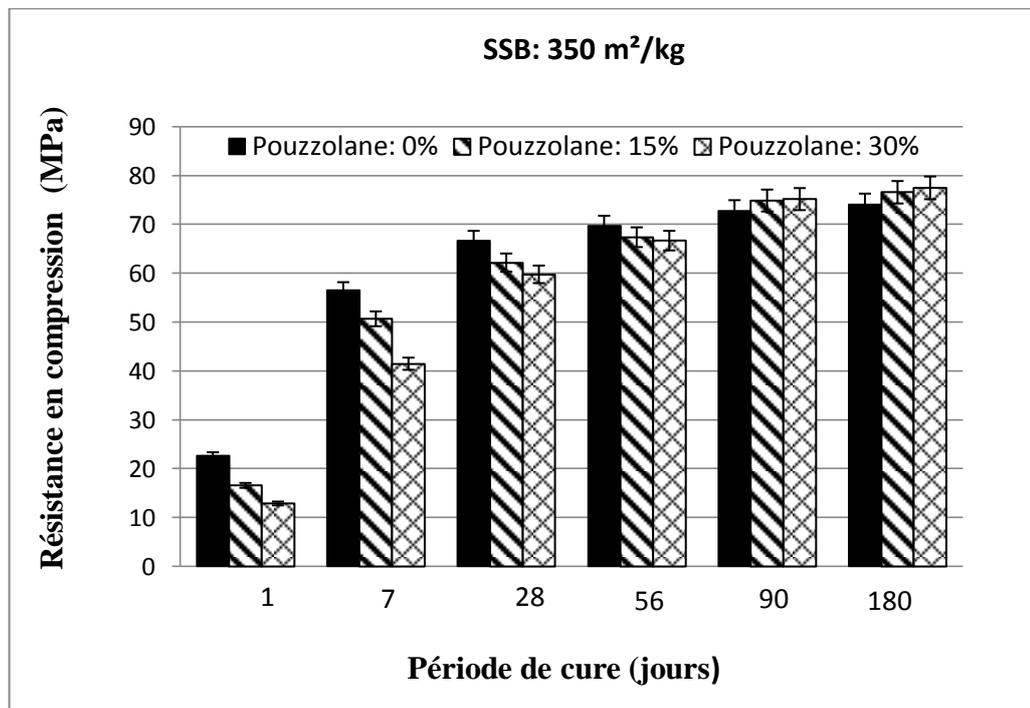


Figure 4.18: Evolution de la résistance en compression des mortiers à la pouzzolane naturelle (SSB : 350 m²/kg).

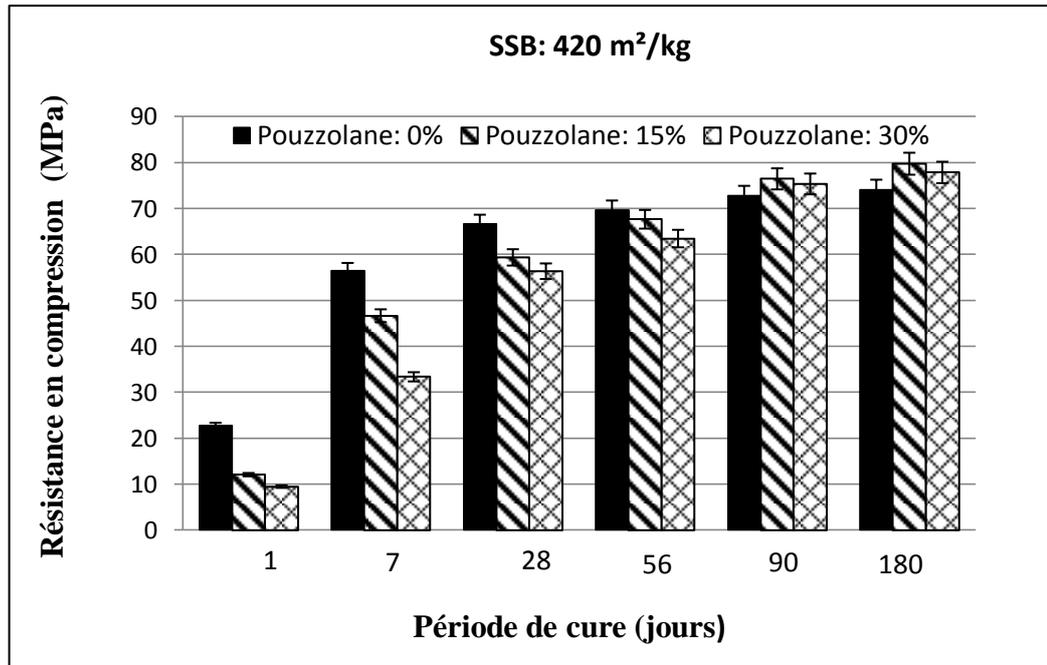


Figure 4.19: Evolution de la résistance en compression des mortiers à la pouzzolane naturelle (SSB : 420 m²/kg).

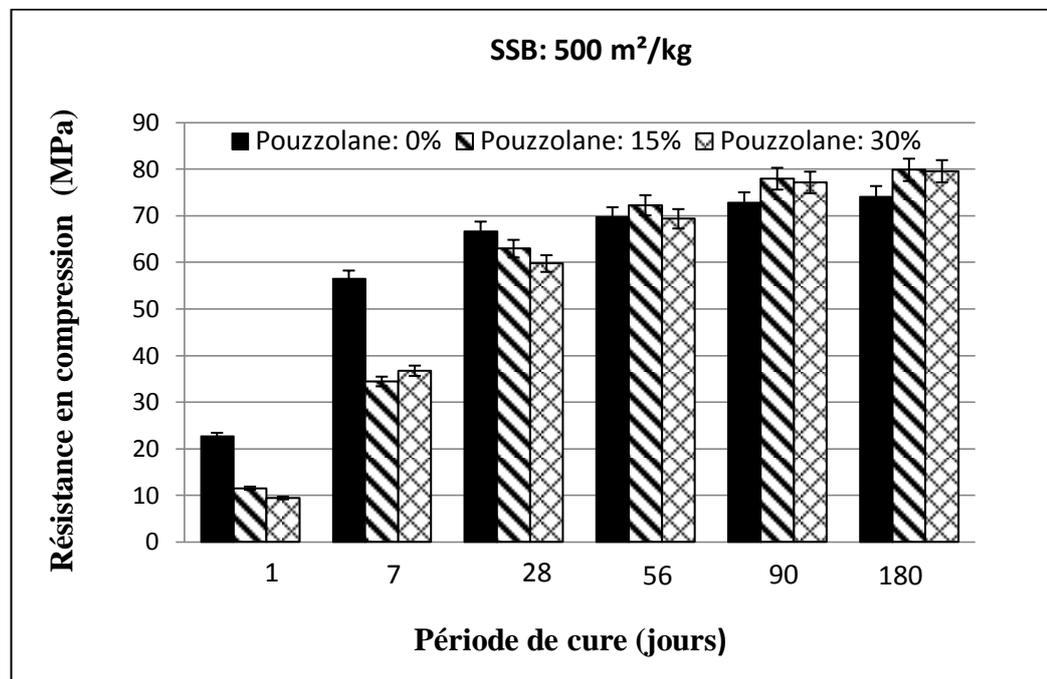


Figure 4.20: Evolution de la résistance en compression des mortiers à la pouzzolane naturelle (SSB : 500 m²/kg).

- Influence de la finesse de la pouzzolane naturelle

L'influence de la finesse de la pouzzolane naturelle sur le développement de la résistance en compression des mortiers autoplacants est représentée sur les figures 4.21 et 4.22. On

peut observer que l'augmentation de la surface spécifique de la pouzzolane naturelle a un effet positif sur la résistance en compression à long terme. Une amélioration de la résistance à été notée pour les finesses de 420 m²/kg ou 500 m²/kg. En effet, à 180 jours et pour une substitution de 15%, cette amélioration est de l'ordre de 3,2 MPa pour les mortiers contenant de la pouzzolane d'une surface spécifique de 420 m²/kg et 500 m²/kg comparée à celle développée par les mortiers renfermant de la pouzzolane d'une finesse de 350 m²/kg. Cette augmentation de résistance est probablement due à une hydratation rapide et complète générée par l'augmentation de la finesse de l'addition.

Il a été affirmé par plusieurs recherches que la surface de contact disponible pour les réactions d'hydratation devient plus grande avec l'augmentation de la surface spécifique. Egalement, les propriétés de remplissage par les particules de pouzzolane sont améliorées [229]. L'effet combiné de ces deux facteurs conduit à une résistance à la compression des MAP plus accrue. Des études précédentes [114] ont rapporté que la finesse de la pouzzolane naturelle affecte significativement l'activité pouzzolanique. Il a été noté que cette dernière augmente avec l'augmentation de la surface spécifique. Par ailleurs, Laakri et al. [227] ont prouvé que l'ajout de la pouzzolane naturelle finement broyée accélère la réaction d'hydratation du ciment à court terme et augmente le dégagement de chaleur.

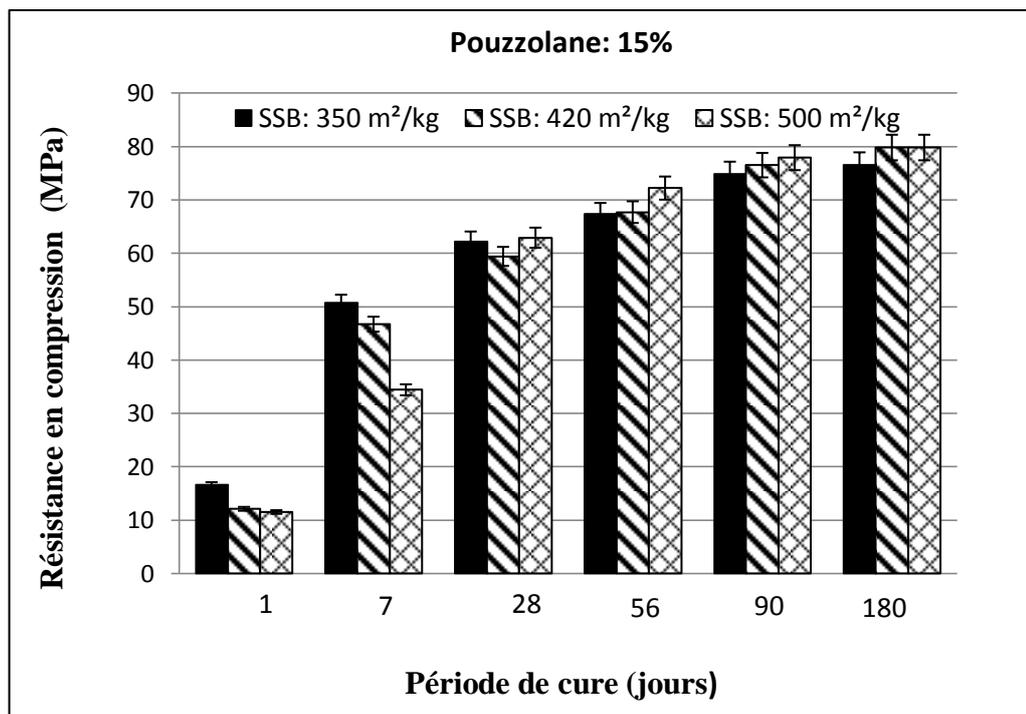


Figure 4.21 : Influence de la finesse de la pouzzolane naturelle sur l'évolution de la résistance en compression des MAP (Taux de substitution: 15%).

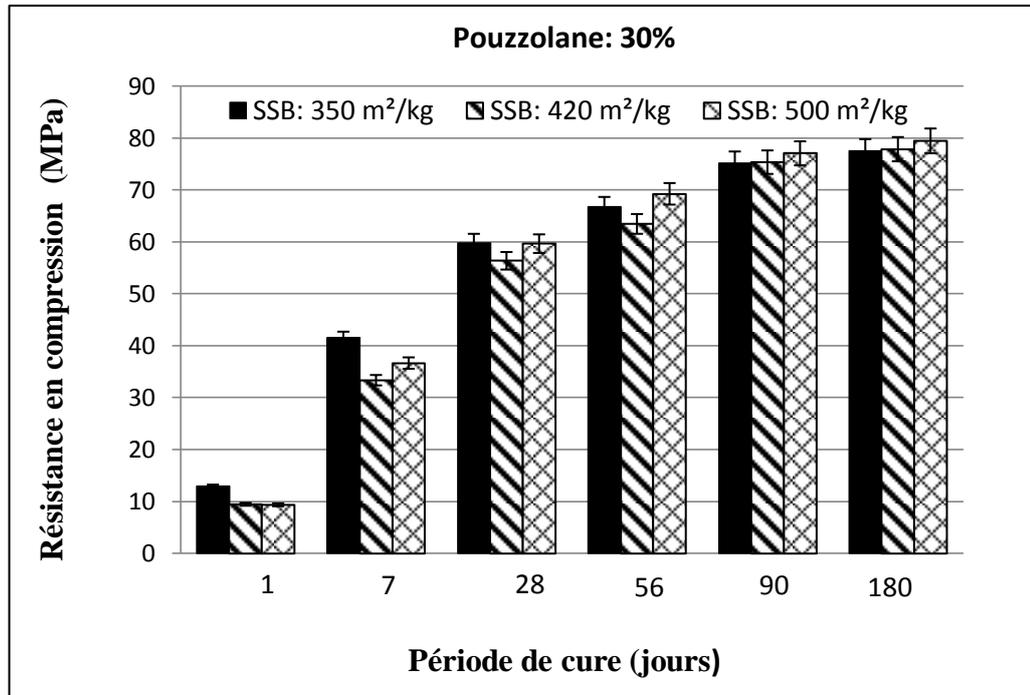


Figure 4.22 : Influence de la finesse de la pouzzolane naturelle sur l'évolution de la résistance en compression des MAP (Taux de substitution: 30%).

4.6. Influence des additions minérales sur le retrait total et endogène des MAP

4.6. 1. Influence du laitier sur le développement du retrait total et endogène des MAP

- **Influence du taux de substitution du laitier**

Le développement du retrait total et endogène des mortiers autoplaçants, en fonction du taux de substitution du laitier pour chaque finesse étudiée, est représenté sur les figures 4.23, 4.24 et 4.25. On remarque que l'évolution du retrait est très rapide au cours des 20 premiers jours. Ce résultat peut être attribué à une forte consommation d'eau due au séchage et à l'hydratation du ciment. On peut également constater que le retrait total des MAP contenant 15 et 30% de laitier comme substitution au ciment est plus faible en comparaison avec celui du mortier de référence à jeune âge. Ce résultat peut être expliqué par le fait que le laitier ralentit la cinétique d'hydratation conduisant ainsi à la formation d'un nombre inférieur d'hydrates comparé avec le mortier à 0% laitier qui se traduit donc par un retrait (endogène) largement inférieur et par conséquent un faible retrait total. La diminution du retrait est beaucoup plus prononcée après la première semaine. Cette observation est notée pour les trois finesses adoptées dans notre étude. Pour une finesse de 350 m²/kg, la

diminution du retrait total pour le MAP confectionné avec 30 % de laitier est d'environ 16 % . Egalement, le retrait total diminue de 16% pour une surface spécifique de 500 m²/kg par rapport au mortier témoin à 90 jours.

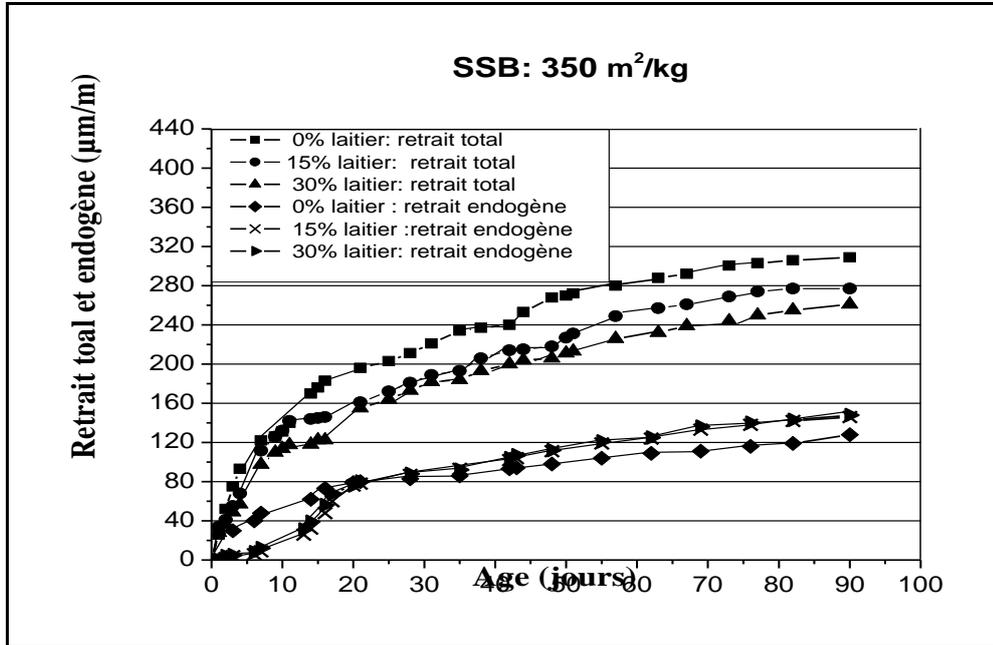


Figure 4.23 : Retrait total et endogène des MAP au laitier (SSB: 350 m²/kg).

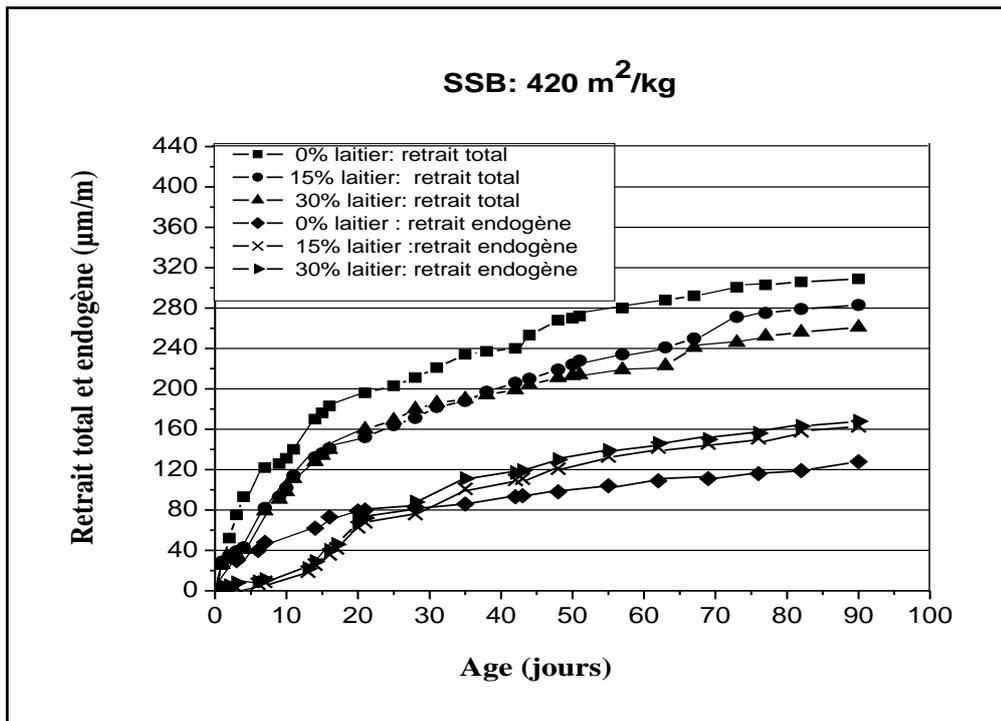


Figure 4.24 : Retrait total et endogène des MAP au laitier (SSB: 420 m²/kg).

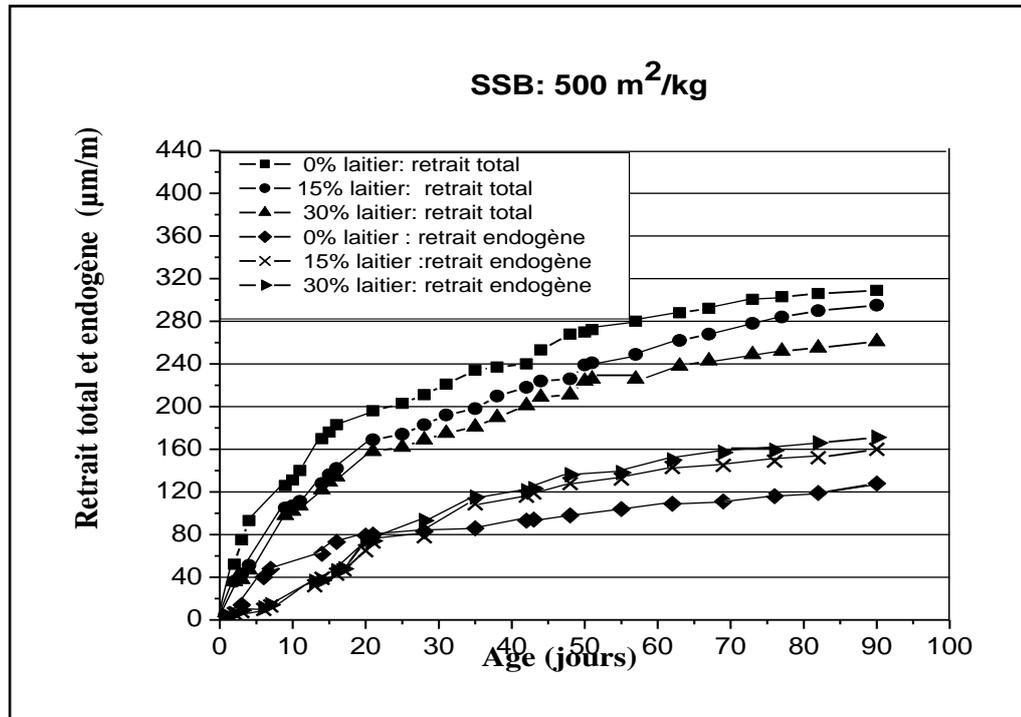


Figure 4.25 : Retrait total et endogène des MAP au laitier (SSB: 500 m²/kg).

Cette diminution de retrait peut être attribuée à la densification de la microstructure et à la plus faible perméabilité des mortiers contenant du laitier à des âges plus avancés, entraînant ainsi une dessiccation plus faible conduisant à des déformations de retrait de séchage réduites. En fait, comme on peut le constater sur la figure 4.26, la densification de la microstructure des MAP incorporant du laitier affecte probablement le mécanisme de transport de l'eau, entraînant ainsi une perte de masse inférieure à celle du mortier témoin.

Selon la littérature, l'ajout des additions minérales tel que le laitier affecte de manière significative le retrait du béton [230]. Une réduction du retrait de séchage a été rapportée pour une teneur élevée de laitier ($\geq 50\%$) [58]. D'autre part, il a été montré que les mélanges de mortiers confectionnés avec du ciment Portland développent un retrait total plus important que ceux avec du ciment au laitier de haut fourneau [231]. D'après ces auteurs, la faible réactivité du laitier engendre une diminution du retrait chimique et par conséquent un retrait total inférieur à celui du mortier témoin. Cependant, Wang et Lin [64] ont montré que le retrait du béton autoplaçant augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier.

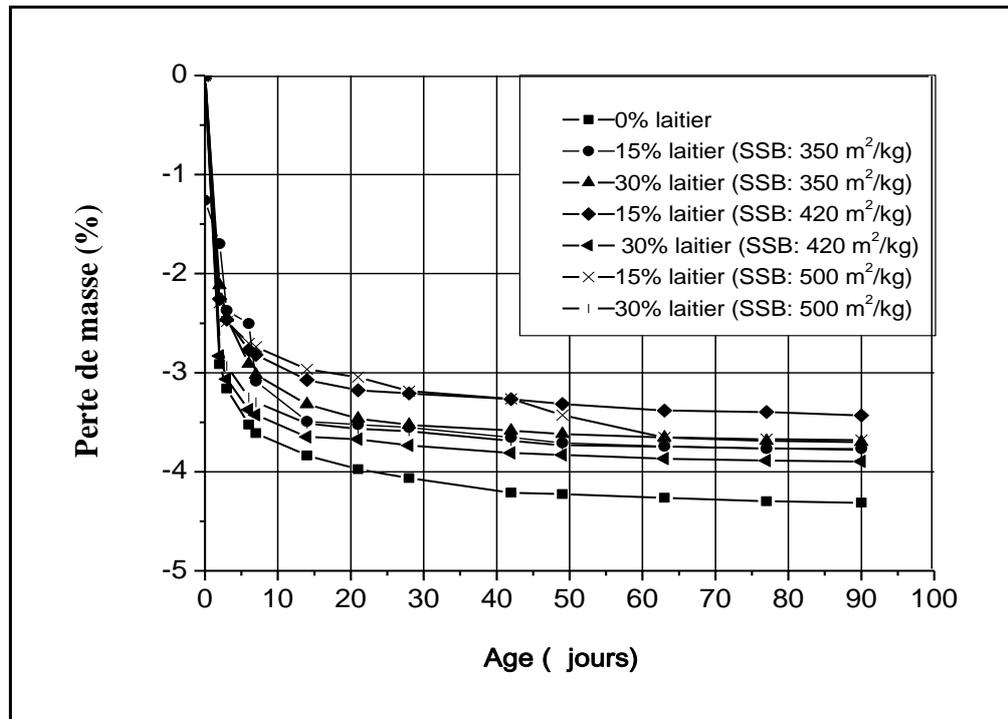


Figure 4.26 : Perte de masse des MAP au laitier.

Le retrait endogène définit la réduction volumique en cours d'hydratation d'un matériau à matrice cimentaire en condition isotherme et sans échange d'humidité avec l'extérieur. Ce retrait est provoqué par la contraction Le Chatelier qui est à l'origine de l'apparition d'un volume de vide dans le réseau poreux et par conséquent de la baisse de l'humidité relative. En effet, le retrait endogène est exprimé comme une relation de proportionnalité entre les déformations résultantes et le degré d'hydratation. Le retrait endogène dépend uniquement des paramètres intrinsèques à savoir les réactions d'hydratation et la composition du mortier.

L'influence du taux de substitution du laitier sur le développement du retrait endogène des MAP pour les trois finesses de l'addition est illustrée sur les figures précédentes 4.23, 4.24 et 4.25. Le laitier est considéré comme un matériau pouzzolanique à faible réactivité, efficace pour réduire le retrait endogène des mortiers et des bétons. Du fait de son hydraulité latente, le laitier n'a pas d'effet sur l'évolution du retrait endogène au jeune âge, quelle que soit la surface spécifique du laitier. Au bout de 28 jours environ, le laitier commence à contribuer à la formation d'hydrates plus importante que le mortier témoin et donc un retrait d'autodesiccation plus important. Cet effet est beaucoup plus observé pour les finesses de 420 m²/kg et 500 m²/kg. Cette augmentation est en moyenne de 25% et

34 % lorsque le ciment est substitué par respectivement 15 % et 30 % de laitier d'une surface spécifique de 500 m²/kg. Liu et al. [232] ont noté qu'à long terme, le retrait endogène augmente avec la substitution du ciment par du laitier. Certains auteurs [233] ont souligné que l'augmentation du retrait endogène est causée par la structure poreuse plus fine des bétons à plus forte teneur en laitier, générant ainsi des contraintes de traction par les ménisques d'eau dans les capillaires, par conséquent un retrait plus élevé. Selon Lu et al. [234], pour le même rapport Eau/Liant, les pâtes de ciment au laitier présentent un retrait chimique plus élevé comparé à celui des autres mélanges incorporant des cendres volantes. Cependant, des recherches antérieures [235] ont montré que les cendres volantes, la fumée de silice et le laitier de haut fourneau ont des effets différents sur le retrait endogène de la pâte de ciment. Les cendres volantes font diminuer les variations volumiques endogènes tandis que la fumée de silice engendre une augmentation du retrait d'autodessiccation. L'effet du laitier de haut fourneau se situe entre celui des deux additions mentionnées ci-dessus.

- Influence de la finesse du laitier

Les figures 4.27 et 4.28 représentent respectivement l'influence de la finesse du laitier sur le retrait total et endogène des MAP pour des taux de substitution de 15 et 30 %. Ces résultats montrent que la surface spécifique du laitier n'a pas d'effet significatif sur l'évolution du retrait total quel que soit le taux de substitution du ciment. Une augmentation d'environ 10 % et 11 % est notée pour les mélanges de mortier MAP15L d'une finesse de laitier de 420 m²/kg et 500 m²/kg, respectivement, par rapport au MAP15L d'une finesse de laitier de 350 m²/kg. L'étude expérimentale réalisée par Humad et al. [236] a montré que la surface spécifique du laitier avait un impact très important sur la microstructure, les propriétés mécaniques ainsi que sur le retrait. En effet, il a été conclu que plus la surface spécifique du laitier est élevée, plus la microstructure des mortiers est homogène. Egalement, il a été constaté que l'augmentation de la finesse de l'addition développe une chaleur d'hydratation plus élevée et un retrait de séchage plus faible.

En ce qui concerne le retrait endogène, les résultats montrent que l'augmentation de la finesse du laitier de 350 m²/kg à 420 m²/kg ou 500 m²/kg entraîne un retrait légèrement supérieur. Cet effet est beaucoup plus observé pour 30 % de substitution de ciment par du laitier. Cette augmentation est en moyenne de 11% et 12% pour des finesses de laitier de

420 m²/kg et 500 m²/kg respectivement par rapport aux MAP avec une surface spécifique de laitier de 350 m²/kg.

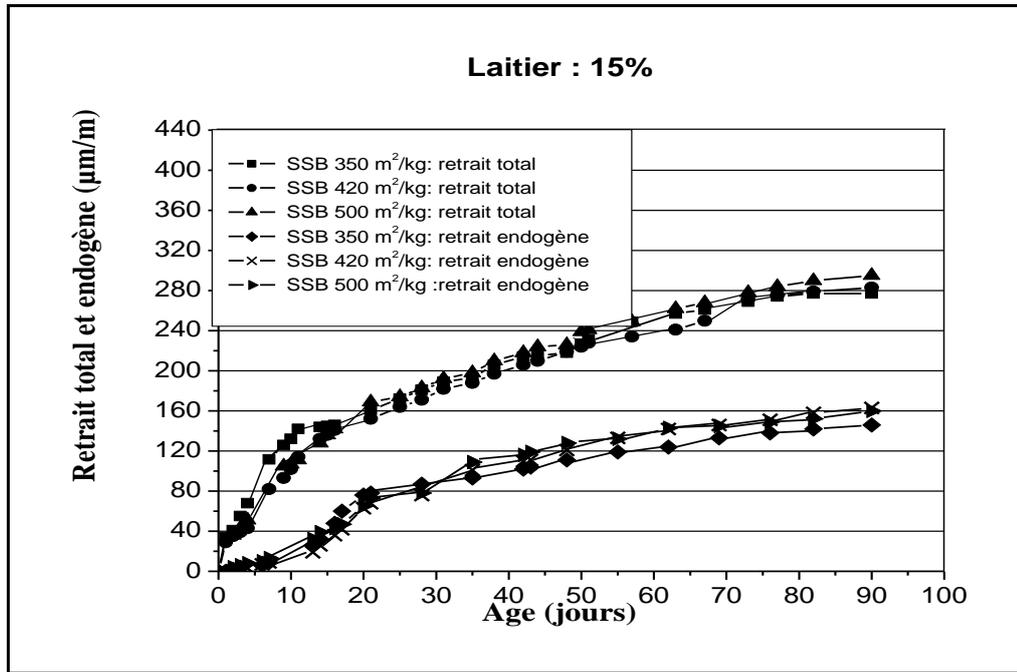


Figure 4.27 : Influence de la finesse du laitier sur le retrait total et endogène des MAP (taux de substitution : 15%).

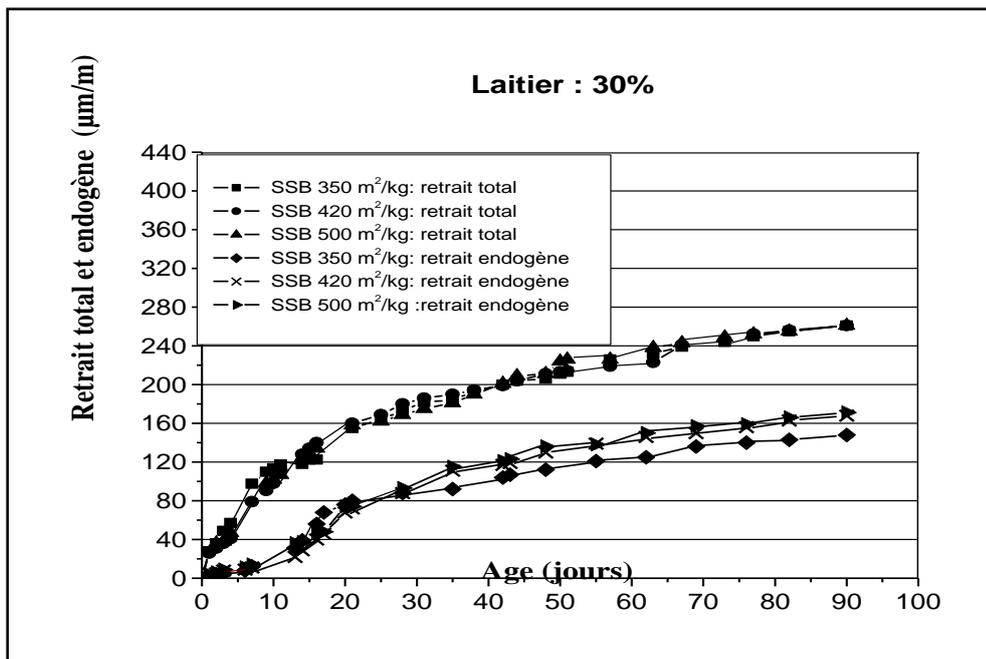


Figure 4.28 : Influence de la finesse du laitier sur le retrait total et endogène des MAP (taux de substitution : 30%).

L'évolution du retrait endogène peut être attribuée aux réactions d'hydratation accélérées générées par l'augmentation de la finesse du laitier. Cela est dû à une plus grande surface spécifique des grains de laitier qui sont exposée à l'hydratation. Par conséquent, une augmentation des tensions capillaires à l'intérieur de la pâte de ciment durcie est observée [58]. Des études expérimentales [231] ont montré que la finesse du laitier affecte le développement du retrait endogène. Lorsque la finesse de Blaine est plus élevée, le retrait endogène de la pâte de ciment augmente. Les résultats d'autres travaux [233] ont affirmé que pour un taux de substitution de 40 % de laitier, l'augmentation de la finesse d'addition de 400 m²/kg à 600 m²/kg ou 800 m²/kg provoque un retrait endogène plus important.

4.6. 2. Influence de la pouzzolane sur le développement du retrait total et endogène des MAP

- Influence du taux de substitution de la pouzzolane naturelle

Les résultats de la variation du retrait total et endogène, obtenus pour les mortiers renfermant différents taux de pouzzolane naturelle, sont illustrés sur les figures 4.29, 4.30 et 4.31. Il est bien observé qu'en substituant le ciment par la pouzzolane naturelle, le mortier développe un retrait total légèrement accru aux premiers jours quelque soit la surface spécifique de la pouzzolane.

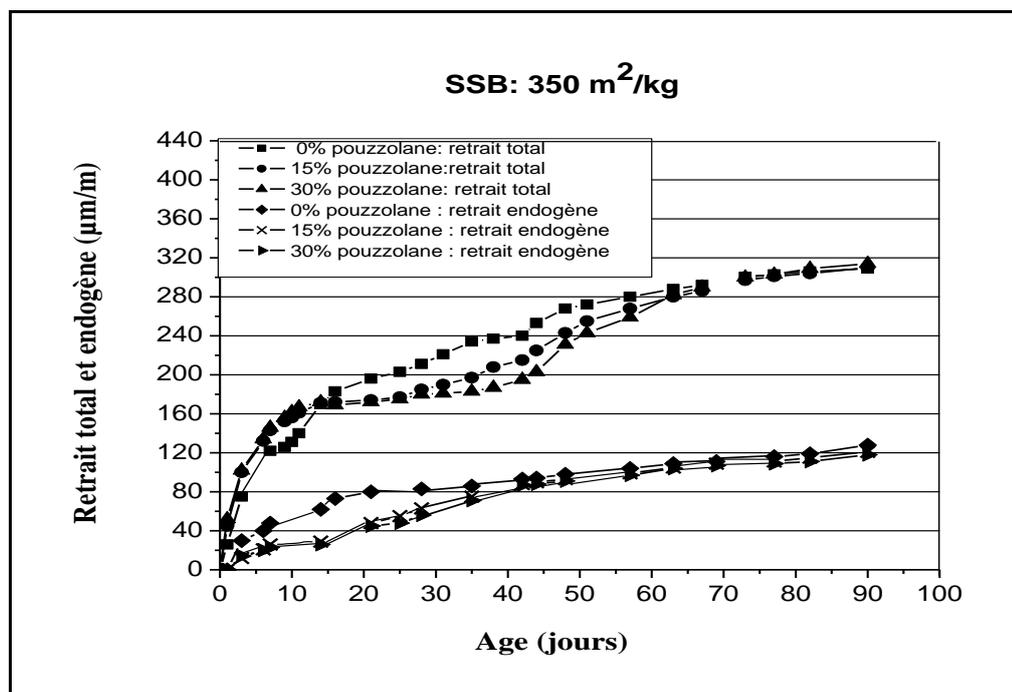


Figure 4.29 : Retrait total et endogène des MAP à la pouzzolane (SSB: 350 m²/kg).

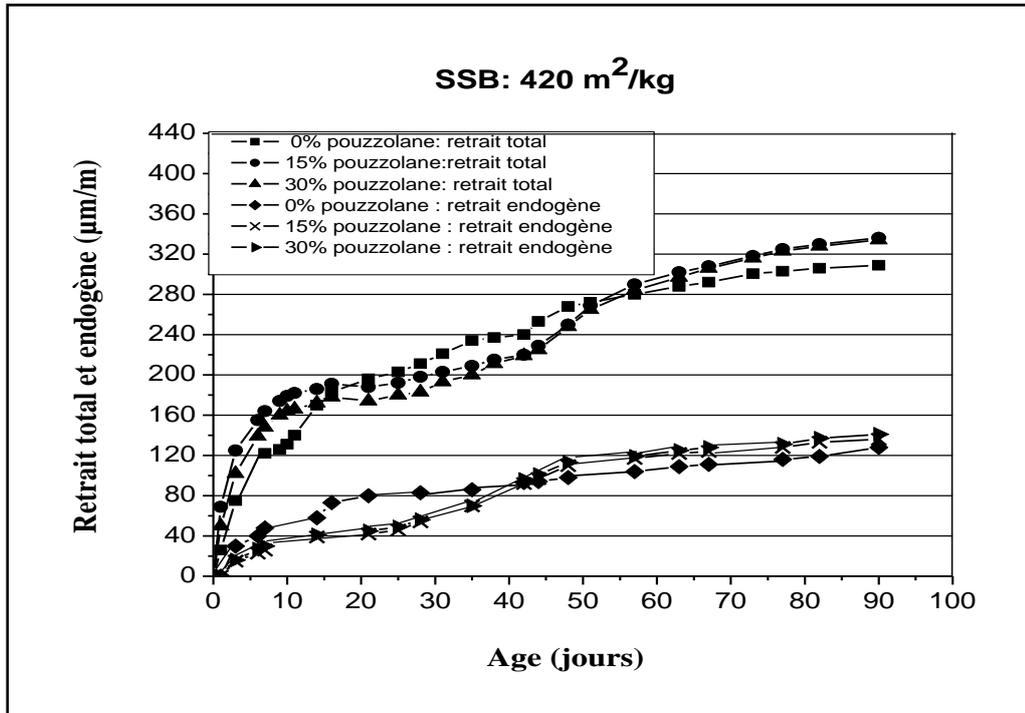


Figure 4.30 : Retrait total et endogène des MAP à la pouzzolane (SSB: 420 m²/kg).

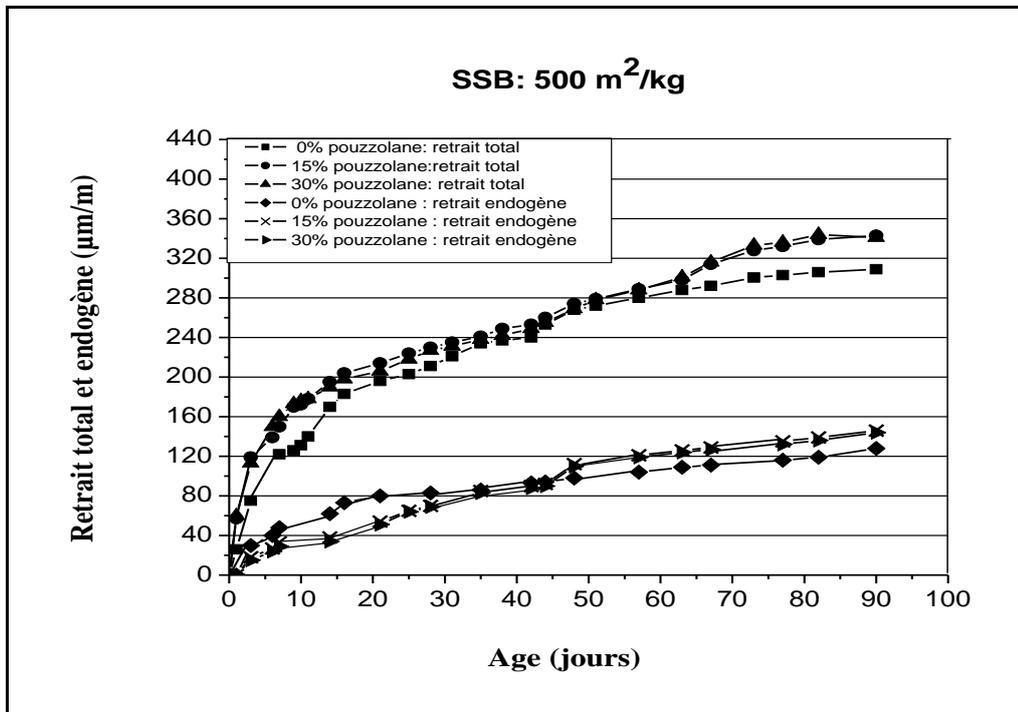


Figure 4.31 : Retrait total et endogène des MAP à la pouzzolane (SSB: 500 m²/kg).

En effet, les valeurs du retrait total, des mortiers avec 15% et 30% de pouzzolane naturelle (500 m²/kg) atteignent une augmentation de 13 % et 14 % (à 10 jours), respectivement. Ce phénomène pourrait être lié à la formation d'une porosité capillaire provoquée par la

pouzzolane naturelle à court terme qui provoque la formation d'interfaces liquide - gaz générant ainsi une dépression du fluide (eau interstitielle) qui doit être équilibrée par une compression du solide. Après environ deux semaines, l'incorporation de 15 et 30 % de pouzzolane dans les mortiers entraîne une baisse du retrait total par rapport au mélange à 0 % d'addition. Cette observation est notée pour des finesses de 350 m²/kg et 420 m²/kg. Cette diminution des valeurs de retrait peut être attribuée à la densification de la pâte de ciment hydratée et au ralentissement de l'évaporation de l'eau qui en résulte. Une autre raison de ce phénomène pourrait être liée à l'activité pouzzolanique latente de la pouzzolane au jeune âge (avant 28 jours) induisant ainsi une formation retardée d'hydrates de silicate de calcium (C-S-H). Par conséquent, la quantité d'eau consommée par l'hydratation est moins importante, ce qui génère un retrait d'auto dessiccation moins important et par conséquent un retrait total inférieur par rapport à celui du mortier de référence. Cependant, à des stades de séchage plus avancés et pour des finesses plus élevées (420 m²/kg et 500 m²/kg), le retrait total des MAP à la pouzzolane est supérieur à celui du mortier témoin. Comme le montrent les figures 4.30 et 4.31, la substitution de 30 % du ciment par de la pouzzolane naturelle a provoqué une augmentation du retrait total de 11 % et 12 % pour 420 m²/kg et 500 m²/kg respectivement (à 90 jours), ce qui pourrait être attribué à une réaction pouzzolanique plus active à des âges de dessiccation plus avancés. D'autre part, les résultats ont montré que plus le taux de pouzzolane est élevé plus le pourcentage de perte de masse est important (Figure 4.32).

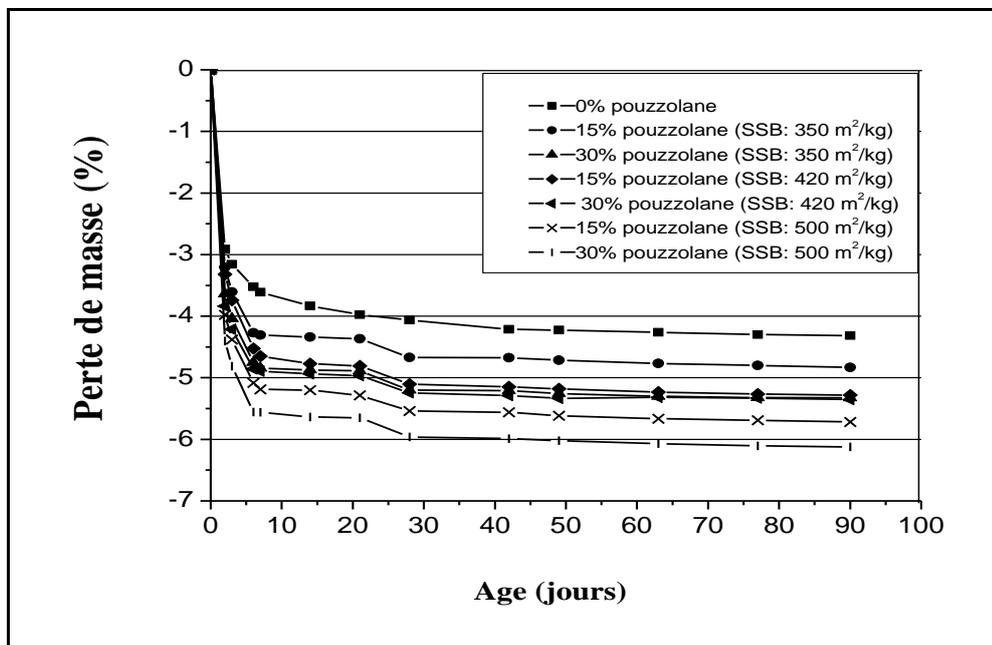


Figure 4.32 : Perte de masse des MAP à la pouzzolane.

L'effet de la pouzzolane est plus accentué pour des finesses plus élevées. Par conséquent les mortiers à la pouzzolane sont plus sujets à la déformation comparée au mortier sans addition. Des recherches antérieures [237] ont confirmé que le retrait du BAP contenant de la pouzzolane naturelle est similaire à celui à base de cendres volantes et légèrement supérieur à celui du BAP avec ajout de filler calcaire. D'autre part, Itim et al. [137] ont constaté que la présence de pouzzolane naturelle à des taux de 10%, 20% et 30% engendre une nette réduction du retrait comparé au mortier sans pouzzolane. Cette réduction est d'autant plus marquante après la première semaine où la pouzzolanité commence à prendre effet. A long terme, le retrait de dessiccation est comparable quelque soit le taux de substitution du ciment. Adekunle et al. [101] ont montré, en étudiant les propriétés des BAP contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets industriels comme additions minérales que tous les mélanges contenant 10% et 15% de pouzzolane naturelle présentent une faible déformation de retrait de dessiccation allant de l'ordre de 230 à 270 microns à 28 jours.

Les figures 4.29, 4.30 et 4.31 donnent également les résultats du retrait endogène des mortiers autoplaçants incorporant de la pouzzolane naturelle. A partir de ces figures, on peut conclure que le retrait d'auto-dessiccation du MAP avec 0% de PN se produit principalement dans les 28 premiers jours d'hydratation, ce qui peut atteindre environ 65% du retrait endogène total. La tendance du retrait endogène des mélanges à la pouzzolane naturelle est similaire à celle des MAP au laitier. En effet, l'ampleur de la déformation des MAP à la pouzzolane naturelle est inférieure à celle du mortier sans PN avant environ 40 jours d'hydratation. Ce comportement peut être attribué au retard de l'hydratation initiale. Néanmoins, à un âge plus avancé, le retrait endogène est supérieur à celui du mortier témoin dans une fourchette de 11 % et 12 % pour les MAP contenant 15 % et 30 % de PN respectivement (SSB : 500 m²/kg). Cet effet est moins remarquable pour une finesse de 350 m²/kg. Cela peut s'expliquer par l'augmentation des tensions capillaires due au développement de micropores à l'intérieur de la pâte de ciment durcie et à la consommation de l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) due à la réaction pouzzolanique [238]. L'évolution du retrait endogène des mortiers à la pouzzolane naturelle a été étudiée par Itim et al. [137]. Une activité pouzzolanique a été remarquée au jeune âge. Les auteurs ont attribué ce phénomène à une importante consommation d'eau. A long terme, le retrait endogène des mortiers confectionnés à base de 20% et 30% de pouzzolane est réduit et devient nettement inférieur à celui du mortier témoin. Par ailleurs, Ayed et al. [156] ont étudié l'influence des

fines calcaires (FC) et de la pouzzolane naturelle (PN) sur les déformations dues au retrait endogène des BAP jusqu'à 400 jours d'âge. Leurs résultats ont montré qu'à 7 jours d'âge, la déformation endogène des BAP FC et BAP PN présente un écart très important en faveur des BAP PN, environ de 35%. À 28 jours, l'écart entre BAP FC et BAP PN est presque nul. A long terme, le retrait endogène du BAP PN dévient important par rapport au BAP FC. En effet, une augmentation de 32% a été enregistrée.

- Influence de la finesse de la pouzzolane naturelle

Les résultats du retrait en fonction de la finesse de la pouzzolane pour une substitution de 15 et 30% d'addition sont reportés sur les figures 4.33 et 4.34. A partir de ces courbes, on peut clairement observer que l'incorporation de la pouzzolane, finement broyée à des finesses de 420 m²/kg ou 500 m²/kg engendre une augmentation du retrait total et endogène comparé avec celui des mortiers contenant de la pouzzolane d'une surface spécifique de 350 m²/kg. En effet, une hausse d'environ 11 % et 12 % a été enregistrée pour le retrait total des compositions incorporant 15 % de PN broyées à des finesses de 420 m²/kg et 500 m²/kg, respectivement.

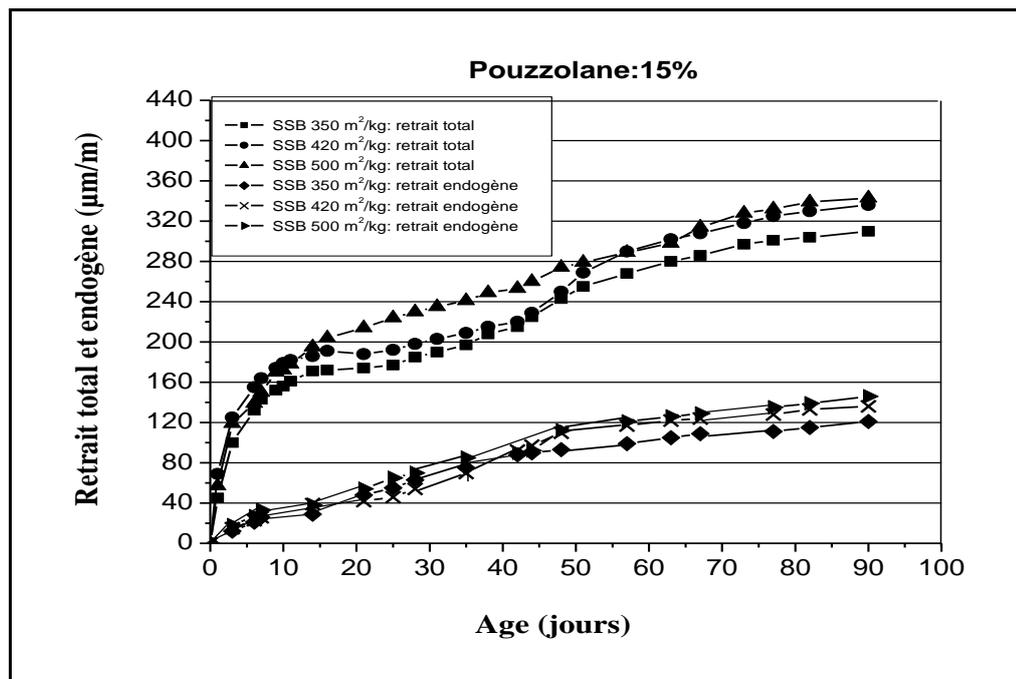


Figure 4.33 : Influence de la finesse de la pouzzolane sur le retrait total et endogène des MAP (taux de substitution : 15%).

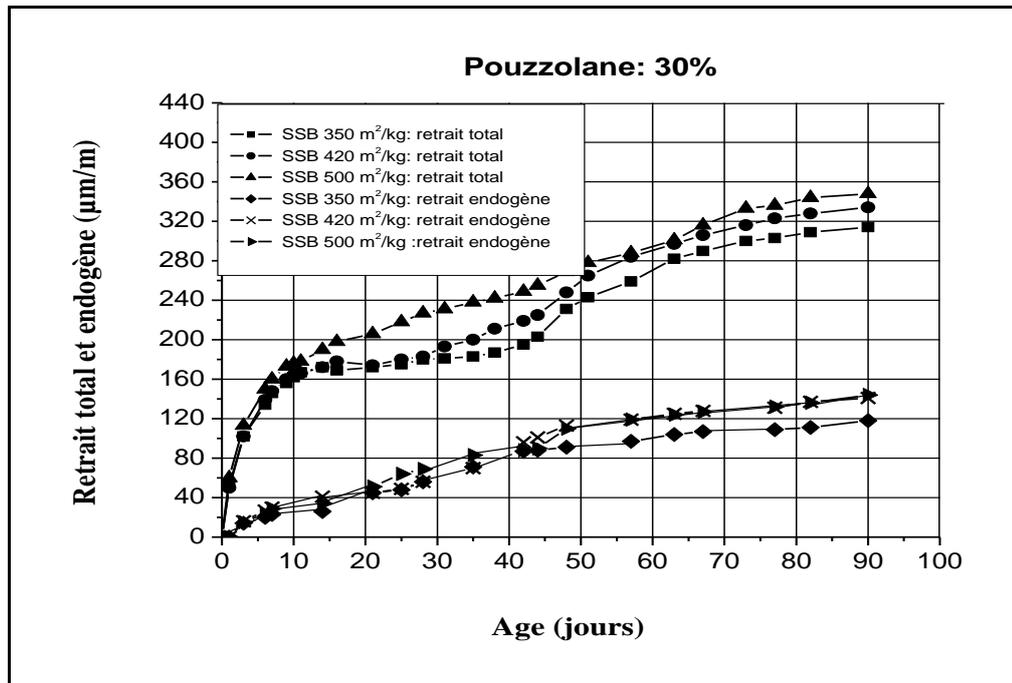


Figure 4.34 : Influence de la finesse de la pouzzolane sur le retrait total et endogène des MAP (taux de substitution : 30%).

Alors que, le retrait d'autodesiccation est supérieur d'environ 12 % et 13 %, respectivement par rapport à celui du mélange renfermant de la PN d'une finesse de Blaine de 350 m²/kg à l'âge de 90 jours. La raison peut être expliquée comme suit : les réactions d'hydratation ont plus de progrès pour des finesses plus élevées ce qui signifie la formation de plus de produits d'hydratation (C-S-H), donc la quantité d'eau consommée par l'hydratation augmente avec l'augmentation de la finesse générant ainsi un retrait endogène plus élevé. D'autre part, l'augmentation du retrait avec l'augmentation de la finesse de la pouzzolane peut être attribuée à une grande porosité capillaire caractérisant la microstructure créant ainsi l'apparition de ménisques conduisant à une hydratation et un séchage très rapides à l'intérieur de la pâte de ciment hydraté. Il en résultera donc des déformations plus importantes.

4.7. Influence des additions minérales sur l'absorption capillaire des MAP

L'absorption capillaire, considérée comme un indicateur de durabilité, dépend de deux paramètres majeurs à savoir la porosité du mortier et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (sorptivité). Ces paramètres peuvent être influencés par la composition du liant, notamment, la nature et la finesse des additions minérales.

4.7. 1. Influence du laitier sur l'évolution de l'absorption capillaire des MAP

- Influence du taux de substitution du laitier

Les figures 4.35, 4.36 et 4.37 présentent l'absorption d'eau par capillarité des MAP au laitier en fonction du temps à 90 jours de maturation. Au regard de ces résultats, il est constaté que la présence du laitier engendre une diminution de l'absorption d'eau (initiale et secondaire). Cette réduction est proportionnelle aux taux de substitution du ciment par le laitier. La même observation est notée quelque soit la surface spécifique du laitier. Pour une finesse de $350 \text{ m}^2/\text{kg}$, l'absorption diminue de $5,62 \text{ mm}$ à $2,37 \text{ mm}$ et $2,14 \text{ mm}$ pour une teneur en laitier de 0% , 15% et 30% respectivement.

La figure 4.40 expose la sorptivité des MAP, calculée par régression linéaire. Les résultats indiquent une plus faible sorptivité des mortiers au laitier par rapport à celle du mortier de référence. Cette réduction reflète une structure poreuse plus raffinée des mortiers confectionnés à base de laitier pouvant être engendrée par la formation de C-S-H secondaire résultant de la réaction pouzzolanique de l'addition à long terme.

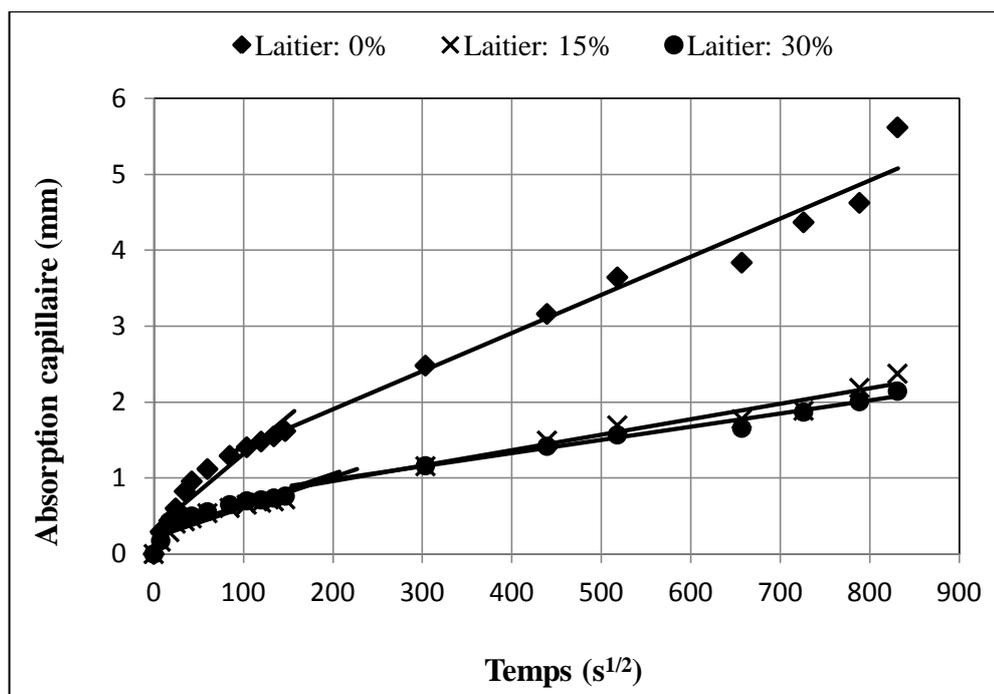


Figure 4.35 : Effet du taux de substitution du laitier sur l'absorption capillaire des MAP (SSB : $350 \text{ m}^2/\text{kg}$).

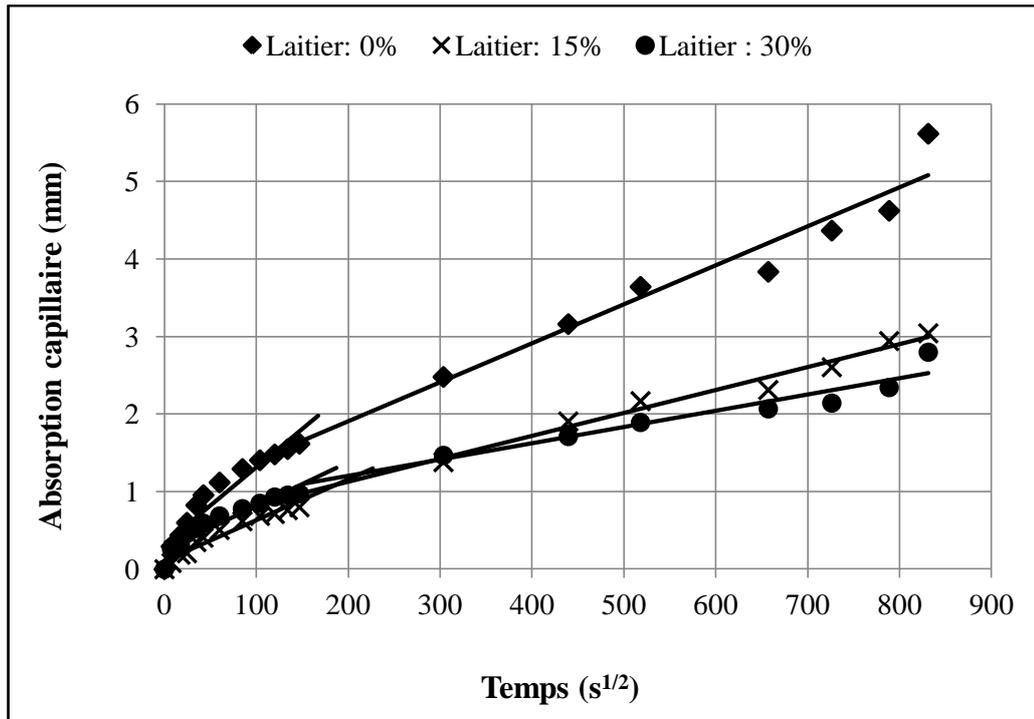


Figure 4.36 : Effet du taux de substitution du laitier sur l'absorption capillaire des MAP (SSB : 420 m²/kg).

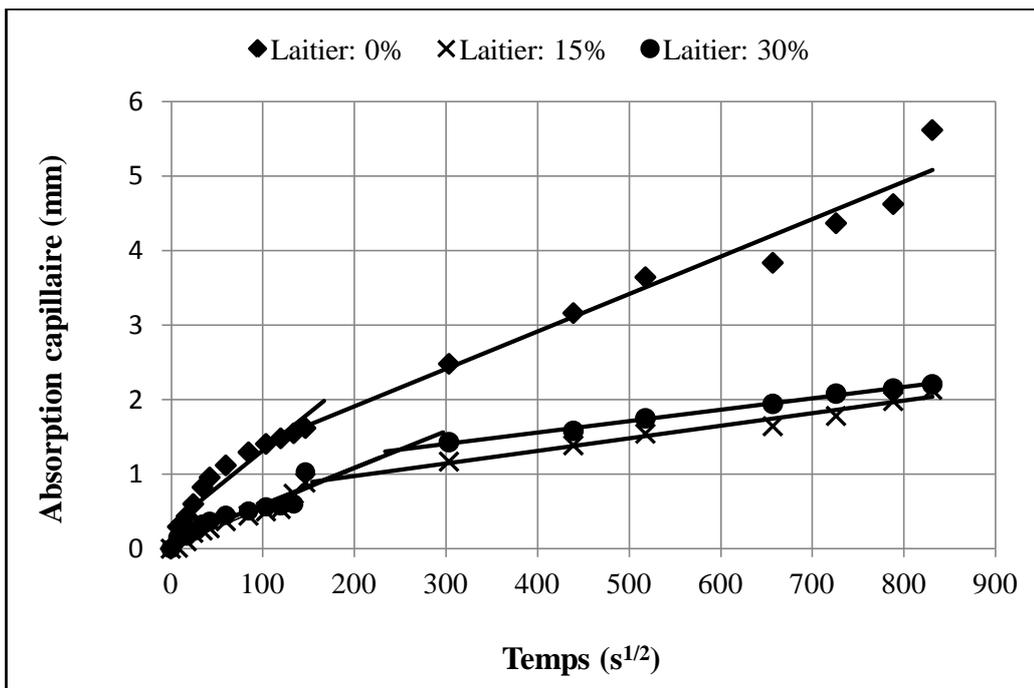


Figure 4.37 : Effet du taux de substitution du laitier sur l'absorption capillaire des MAP (SSB : 500 m²/kg).

Ce résultat est confirmé par une autre recherche réalisée par Deboucha et al. [239], où l'effet du laitier sur l'absorption capillaire d'eau du béton a été étudié. Les auteurs ont

prouvé que l'incorporation du laitier est remarquablement efficace sur l'absorption capillaire des bétons, en particulier, les compositions avec 40 % de laitier. En effet, ces dernières ont subi une diminution d'absorption de 40 % par rapport au béton témoin. La même observation a été faite par Boucetta et al. [240] où la présence du laitier s'est avérée être bénéfique pour le béton autoplaçant. En effet des valeurs de sorptivité inférieures ont été notées pour les mélanges au laitier. Ce comportement a été attribué à l'affinement de la structure poreuse du béton produit par l'effet pouzzolanique du laitier. Dans une autre étude [219], il a été montré que le taux d'absorption initial des BAP au laitier était bien inférieur à celui du béton témoin (substitution de 10% et 15%). A 20 % et 25% de substitution, le taux d'absorption d'eau par capillarité s'est avéré être en augmentation. Comme mentionné par Rahul et al. [241], la substitution du ciment par du métakaolin ou du laitier entraîne une diminution de la sorptivité des bétons comparé à celle du béton de référence.

- Influence de la finesse du laitier

L'effet de la surface spécifique du laitier sur la variation de l'absorption d'eau capillaire des mélanges de mortier à l'âge de 90 jours est présenté sur les figures 4.38 et 4.39 pour des taux de substitution de 15 et 30% respectivement. A partir de ces résultats, il est perceptible que l'augmentation de la surface spécifique du laitier n'a pas un effet significatif sur l'absorption capillaire durant les premières heures de contact avec de l'eau. En effet, les valeurs de l'absorption initiale d'eau sont comparables pour les trois finesses étudiées. Cette remarque est observée pour les deux taux de substitution du ciment.

Les résultats de la sorptivité des MAP en fonction de la finesse du laitier sont donnés dans la figure 4.40. Egalement, on peut constater que l'augmentation de la finesse du laitier n'a pas d'effet important sur la sorptivité des mortiers. Les valeurs d'absorption d'eau sont comparables pour les deux teneurs en laitier dans le mortier 15% et 30%.

Sevim et Baran [224] ont rapporté que l'effet bénéfique de l'augmentation de la finesse du laitier sur les propriétés d'absorption d'eau est plus remarquable pour les compositions cimentaires à haute teneur en addition. Biricik et Karapinar [242] ont également montré que la surface spécifique du laitier affecte significativement les propriétés de transport. Il a été observé que l'augmentation de la finesse du laitier de 400 m²/kg à 600 m²/kg entraîne une réduction d'environ 60% des valeurs d'absorption d'eau par capillarité.

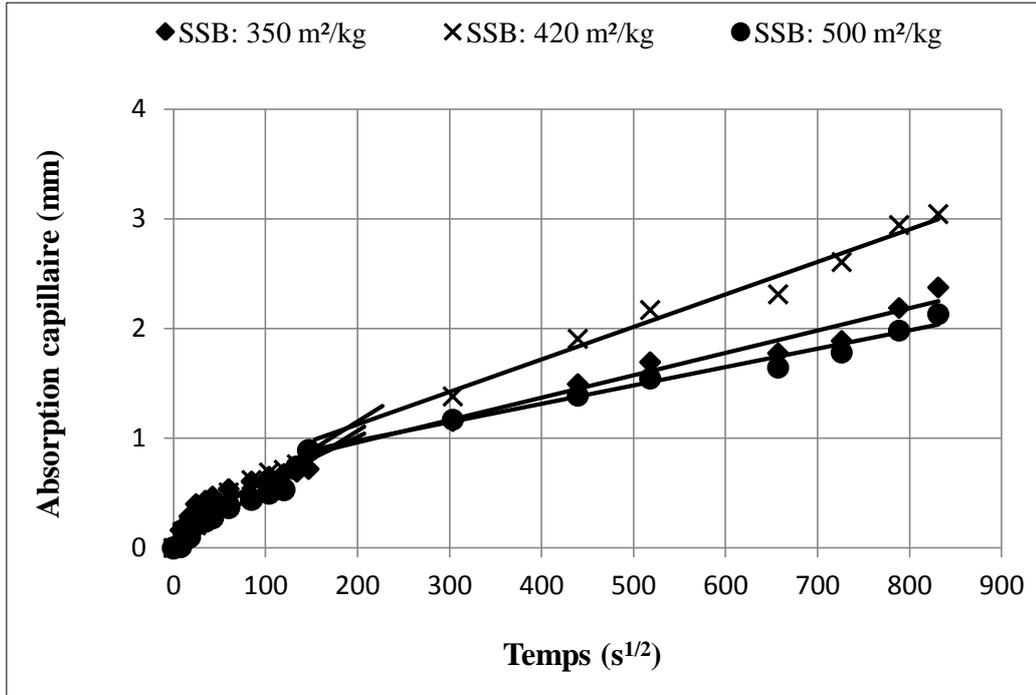


Figure 4.38 : Effet de la finesse du laitier sur l'absorption capillaire des MAP (Laitier : 15%).

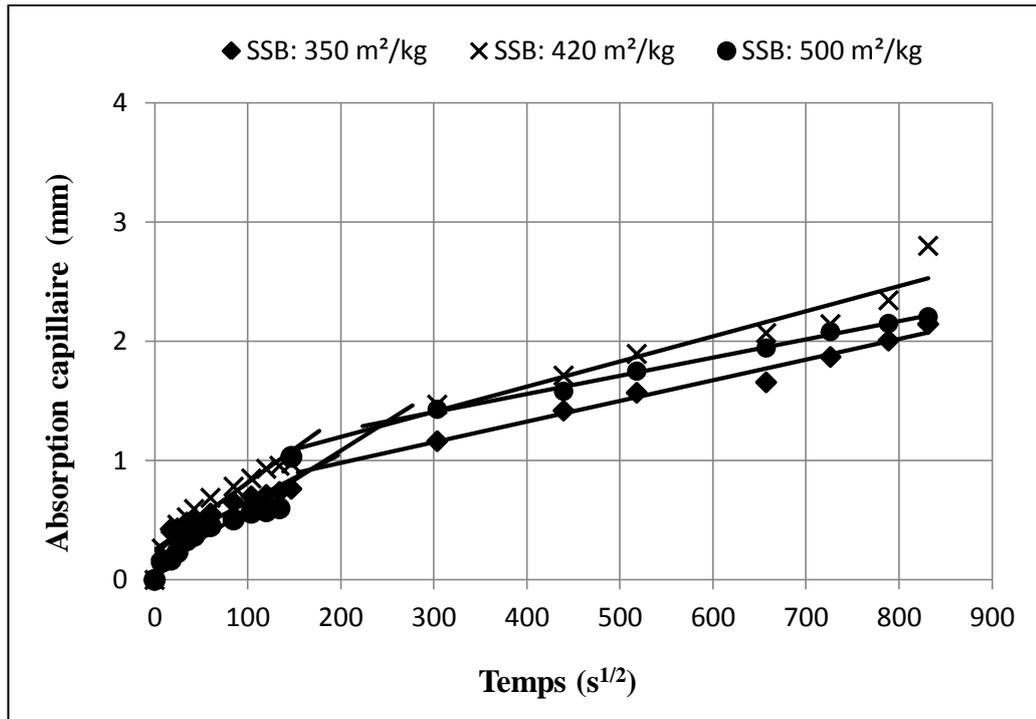


Figure 4.39 : Effet de la finesse du laitier sur l'absorption capillaire des MAP (Laitier : 30%).

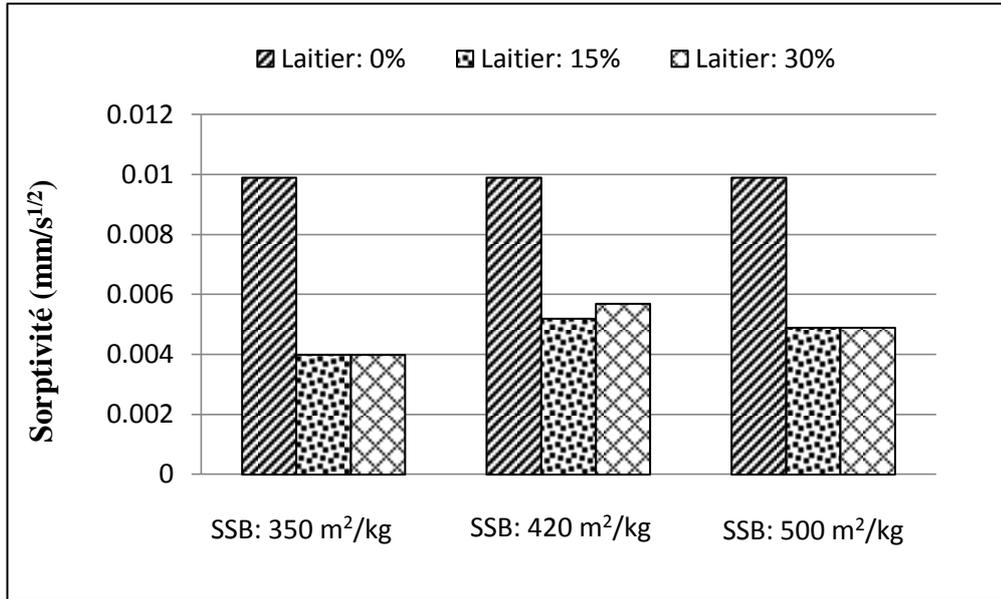


Figure 4.40 : Sorptivité des MAP à base de laitier.

Les résultats exposés à la figure 4.41 présentent les valeurs expérimentales de la résistance en compression en fonction du coefficient d'absorption d'eau capillaire des mortiers au laitier. Comme le montrent ces résultats, il existe une bonne corrélation entre les valeurs de sorptivité et celles de la résistance en compression quelque soit la finesse de l'addition minérale. Le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0,94 ; 0,83 et 0,85 pour des finesses de 350 kg/m², 420 kg/m² et 500 kg/m² respectivement.

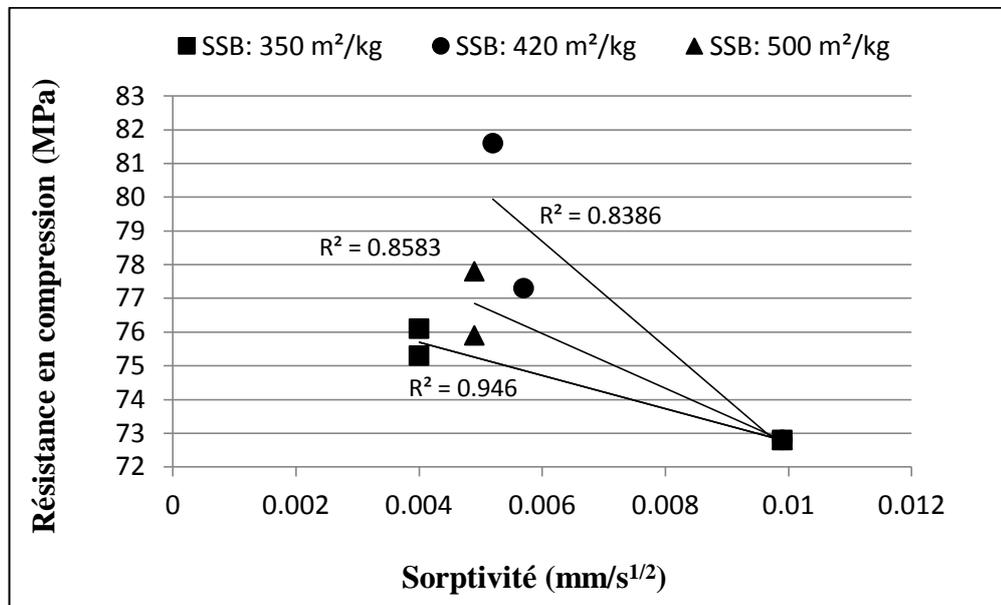


Figure 4.41 : Corrélation entre la résistance en compression et la sorptivité des MAP au laitier.

De plus, la relation montre une augmentation de la résistance à la compression avec la diminution de la sorptivité. Ceci peut s'expliquer par la densification de la microstructure due à l'hydratation du laitier à long terme.

4.7. 2. Influence de la pouzzolane naturelle sur l'évolution de l'absorption capillaire des MAP

• Influence du taux de substitution de la pouzzolane naturelle

En analysant l'évolution des courbes de l'absorption d'eau capillaire représentées sur les figures 4.42, 4.43 et 4.44, nous pouvons constater une légère augmentation des valeurs d'absorption durant les premières heures. Cette remarque est notée pour les trois finesses étudiées. Cet effet est plus accentué après 24h. En effet, on peut constater que l'incorporation de la pouzzolane naturelle dans la composition des mortiers autoplacants conduit à une augmentation de l'absorption d'eau finale. Les résultats indiquent également que la sorptivité des MAP à la pouzzolane naturelle est supérieure à celle du mortier témoin (Figure 4.47). Les résultats sont conformes à ceux trouvés par Menadi et Kenai [243]. En effet, les auteurs ont constaté que l'absorption capillaire d'eau des BAP augmente avec la substitution partielle du ciment par la pouzzolane naturelle. Cela a été attribué à la présence d'un volume important de pores interconnectés par rapport au mélange des BAP sans pouzzolane naturelle.

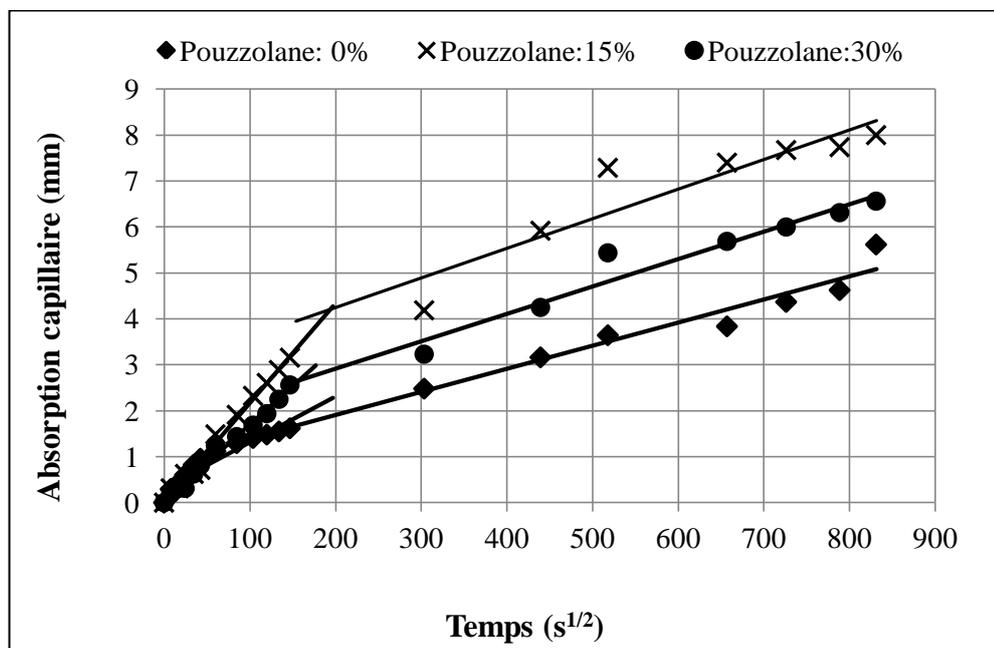


Figure 4.42 : Effet du taux de substitution de la pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire des MAP (SSB : 350 m²/kg).

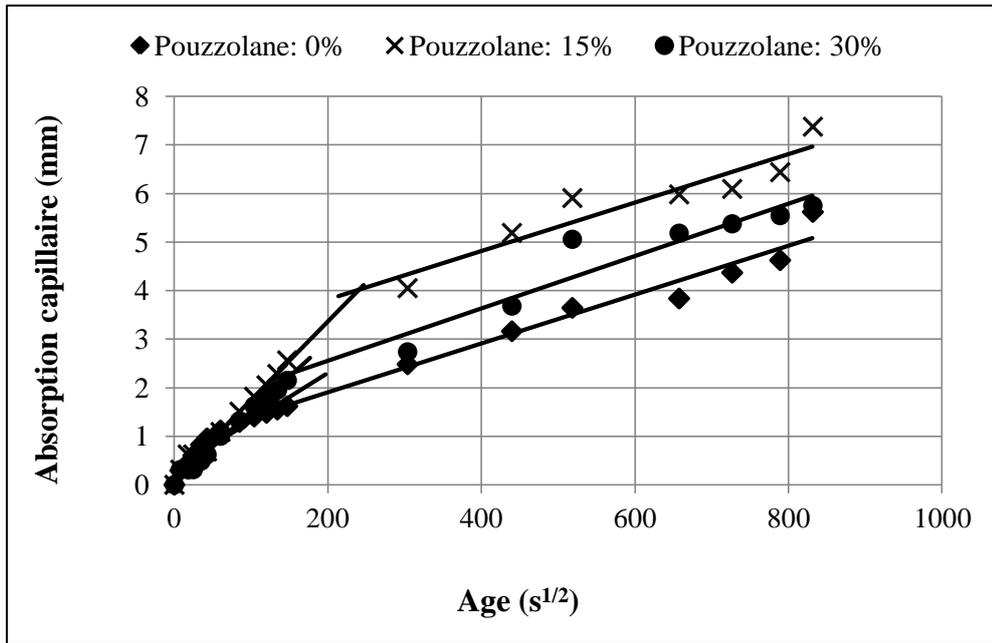


Figure 4.43 : Effet du taux de substitution de la pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire des MAP (SSB : 420 m²/kg).

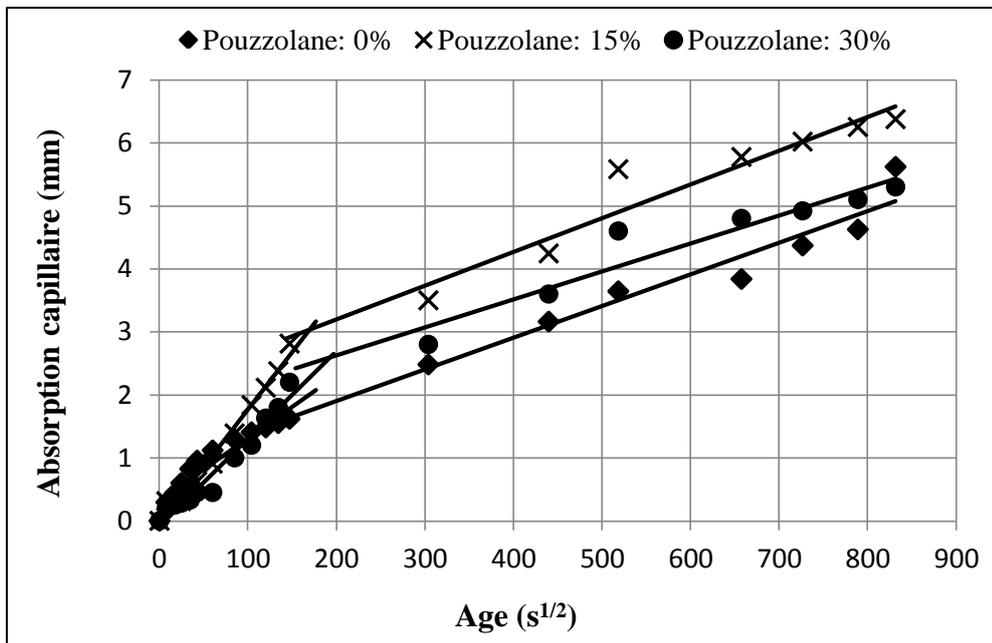


Figure 4.44 : Effet du taux de substitution de la pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire des MAP (SSB : 500 m²/kg).

Des résultats comparables sont obtenus par des recherches menées par Debbih et al. [212], où l'effet de la pouzzolane naturelle sur l'absorption d'eau des BAP à base de granulats naturels et recyclés a été étudié. Il s'est avéré que l'ajout de pouzzolane naturelle aux

mélanges de bétons augmente la sorptivité de ces derniers quelque soit la provenance des granulats. Cependant, l'effet de la pouzzolane est beaucoup plus prononcé pour les BAP confectionnés à base de granulats recyclés. Les données de la littérature montrent des avis contradictoires sur l'effet de cette addition sur le comportement des BAP vis-à-vis de l'absorption capillaire, où plusieurs recherches [239] rapportent l'effet positif de la substitution du ciment par la pouzzolane naturelle. En effet, il a été rapporté que l'absorption d'eau capillaire des mélanges de béton à la pouzzolane est inférieure à celle du béton sans addition.

- Influence de la finesse de la pouzzolane naturelle

L'influence de la finesse de la pouzzolane naturelle sur l'évolution de l'absorption capillaire en fonction du temps des MAP est représentée sur les figures 4.45 et 4.46 pour une substitution de 15% et 30% respectivement. Les résultats montrent que l'augmentation de la finesse de la pouzzolane naturelle entraîne une absorption initiale d'eau légèrement inférieure. Cette diminution d'absorption est plus visible après 24 h. En effet, pour une substitution de 15%, les valeurs d'absorption après 8 jours sont de l'ordre de 8 mm ; 7,4 mm et 6,4 mm pour des finesses de 350 m²/kg, 420 m²/kg et 500 m²/kg respectivement.

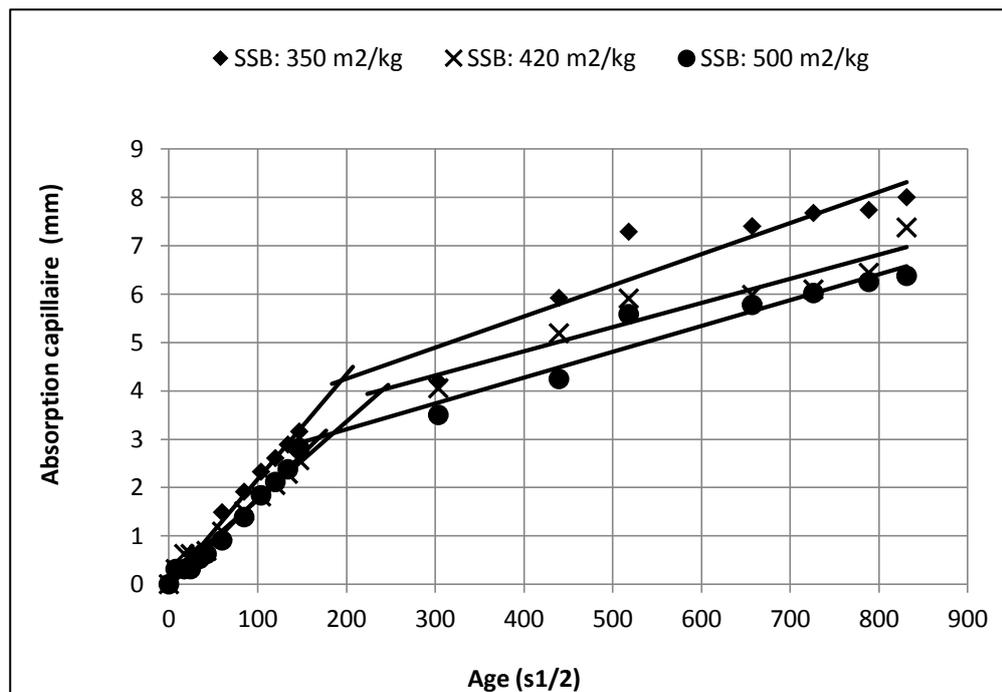


Figure 4.45 : Effet de la finesse de la pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire des MAP (Pouzzolane : 15%).

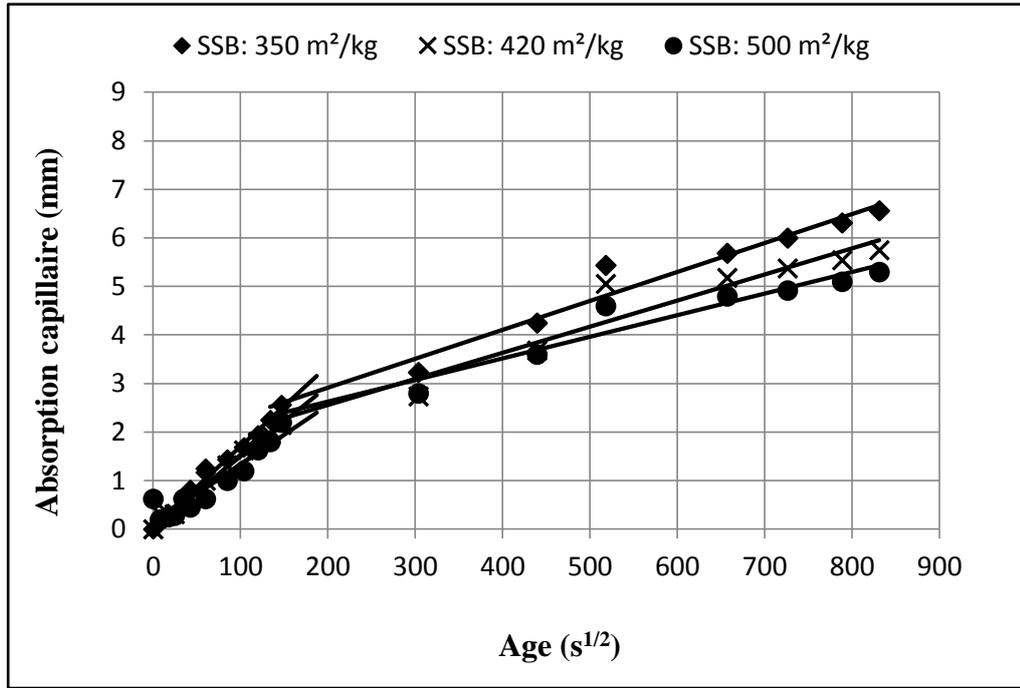


Figure 4.46 : Effet de la finesse de la pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire des MAP (Pouzzolane : 30%).

Les résultats de la sorptivité des mélanges de MAP sont récapitulés dans la figure 4.47. On peut clairement observer que les compositions incorporant de la pouzzolane naturelle de finesse plus élevées (420 m²/kg ou 500 m²/kg) présentent une sorptivité inférieure à celle du mélange avec une pouzzolane d'une surface spécifique de 350 m²/kg.

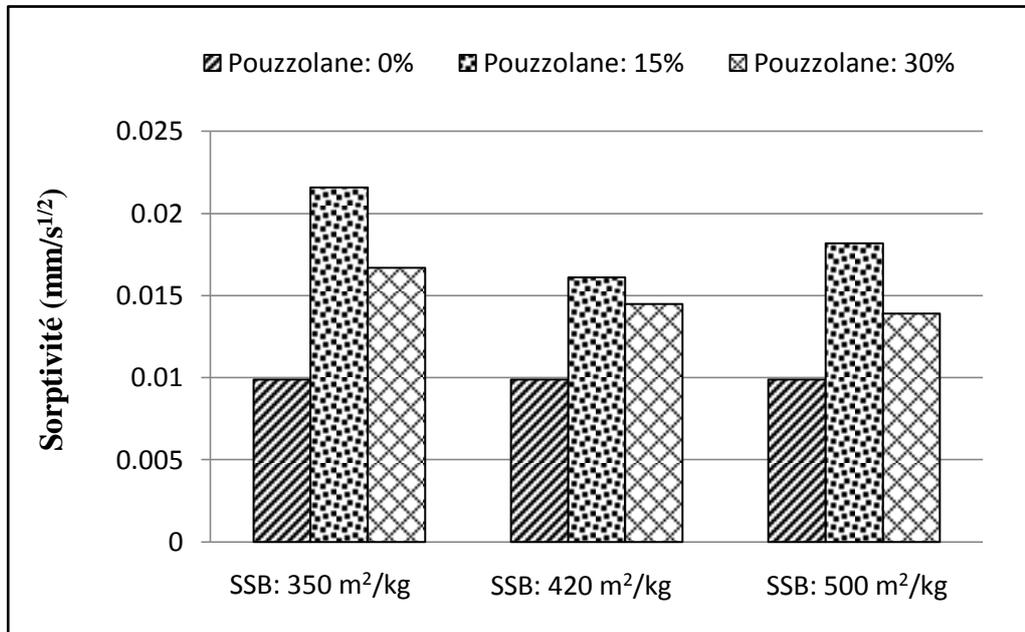


Figure 4.47 : Sorptivité des MAP à base de pouzzolane naturelle.

4.8. Conclusion :

Afin de réduire les effets néfastes du ciment par la réduction de l'énergie de fabrication et de réduction du dégagement de CO₂, des additions minérales sont ajoutés comme substitution au ciment Portland.

Dans cette thèse, nous avons analysé l'effet de la substitution du ciment par 15% et 30% de laitier ou de pouzzolane naturelle ayant trois finesses différentes (350 kg/m², 420 kg/m² et 500 kg/m²) sur l'ouvrabilité et le comportement rhéologique du mortier, sa résistance en compression à jeune âge et à long terme, sur le retrait total et endogène et sur l'absorption capillaire à 90 jours. Les résultats obtenus de cette étude expérimentale révèlent que :

- Le dosage optimal en superplastifiant Sp/L à utiliser dans les compositions de mortiers autoplacants est de 1,5% du poids de ciment ;
- L'augmentation du dosage en superplastifiant diminue la stabilité du MAP à l'état frais est conduit à l'apparition d'un ressuage important.
- Le laitier est un ajout minéral très intéressant du point de vue propriétés des MAP à l'état frais, sa présence améliore l'ouvrabilité et les propriétés rhéologiques du mortier, quelque soit sa surface spécifique. Cependant, la pouzzolane naturelle entraîne une diminution de l'ouvrabilité et une augmentation des paramètres rhéologiques des MAP. Cet effet est plus significatif pour des finesses élevées.
- L'augmentation de la surface spécifique du laitier améliore l'ouvrabilité des MAP. Cependant, l'étalement des mortiers diminue avec l'augmentation de la finesse de la pouzzolane naturelle ;
- L'augmentation de la finesse du laitier de 350 m²/kg à 420 m²/kg ou 500 m²/kg décroît la viscosité plastique et le seuil de cisaillement des MAP. Tandis que l'augmentation de la surface spécifique de la pouzzolane naturelle entraîne une augmentation des paramètres rhéologiques des MAP quel que soit le taux de substitution de l'addition.
- L'incorporation du laitier ou de pouzzolane naturelle réduit la résistance à la compression des MAP au jeune âge. L'ajout du laitier dans les compositions de mortiers autoplacants a un effet positif sur la résistance à la compression à partir de l'âge de 56 jours. La même

tendance est observée pour les mortiers à la pouzzolane naturelle à partir de 90 jours de conservation, où les résistances en compression dépassent celle du mortier control ;

- A long terme, la résistance en compression des MAP à base de 15% de laitier ou de pouzzolane naturelle augmente avec l'accroissement de la surface spécifique à 420 m²/kg et 500 m²/kg. Toutefois, pour 30 % de substitution du ciment par du laitier ou de pouzzolane naturelle, l'augmentation de la surface spécifique de 350 m²/kg à 420 m²/kg ou 500 m²/kg n'a pas un effet significatif sur le développement des résistances en compression des MAP. A un âge de conservation avancé, les résistances sont comparables ;
- Le retrait total des mortiers autoplaçants est influencé par la présence des additions minérales. Il a tendance à être inférieur avec l'incorporation de 15% et 30% de laitier comparé au mortier de référence. Cet effet est visible quelque soit la finesse du laitier. Cependant, à des stades de séchage plus avancés et pour des finesses plus élevées (420 m²/kg et 500 m²/kg), le retrait total des MAP augmente avec la présence de pouzzolane naturelle ;
- L'addition du laitier n'a pas d'effet significatif sur l'évolution du retrait endogène au jeune âge. Cet effet est notable quelque soit la surface spécifique du laitier. Après 28 jours, le laitier provoque un retrait endogène plus important en particulier pour des finesses élevées de 420 m²/kg et 500 m²/kg. L'évolution du retrait endogène des MAP à la pouzzolane naturelle suit la même tendance que celle des mortiers au laitier ;
- Un broyage plus fin du laitier de 350 m²/kg à 420 m²/kg ou 500 m²/kg entraîne une légère augmentation du retrait endogène des MAP. Cet effet est beaucoup plus observé pour 30% de substitution. Par contre, Cette augmentation de retrait est plus significative avec l'accroissement de la surface spécifique de la pouzzolane quelque soit le taux de substitution de l'addition ;
- L'absorption d'eau par capillarité diminue avec l'augmentation du taux de laitier dans le mortier quelque soit sa finesse de mouture. Néanmoins, l'influence de la pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire n'est pas appréciable. Cette dernière augmente considérablement avec la présence de la pouzzolane naturelle et cet effet est plus accentué pour une finesse de 350 m²/kg ;

- L'augmentation de la surface spécifique du laitier de $350 \text{ m}^2/\text{kg}$ à $420 \text{ m}^2/\text{kg}$ induit une augmentation de l'absorption capillaire des mortiers pour les deux taux de substitution du laitier 15% et 30%. Cependant, l'absorption d'eau est inférieure avec l'augmentation de la finesse de la pouzzolane naturelle de $350 \text{ m}^2/\text{kg}$ à $420 \text{ m}^2/\text{kg}$ ou $500 \text{ m}^2/\text{kg}$.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le travail réalisé vise à analyser l'effet de substitution du ciment par le laitier ou la pouzzolane naturelle ayants différentes finesses sur le comportement du mortier autoplaçant à l'état frais et l'état durci.

De cette recherche, il a été conclu que le laitier est une addition qui apporte de bonnes propriétés pour le béton. Il améliore l'ouvrabilité et les propriétés rhéologiques. Permet également de diminuer l'évolution du retrait et de l'absorption capillaire des MAP et BAP ce qui reflète un matériau plus durable. Dans le cas où une ouvrabilité accrue est visée, il est recommandé de broyer d'avantage le laitier à une finesse allant jusqu'à 500 m²/kg pour son effet bénéfique sur l'amélioration des propriétés des MAP à l'état frais, ce qui va permettre aussi de diminuer le coût du matériau par la réduction du dosage en superplastifiant.

En ce qui concerne la pouzzolane naturelle, c'est un ajout cimentaire d'origine naturelle pouvant être utilisé dans les mortiers ou bétons autant qu'un substituant au ciment. Néanmoins, il faudra limiter sa finesse à 350 m²/kg afin d'éviter une perte d'ouvrabilité importante et d'une diminution significative des résistances à jeune âge. Egalement afin de minimiser les déformations du retrait pouvant causer des problèmes de fissuration et donc de durabilité.

La présente étude nous a permis de mettre en évidence l'effet du type, du dosage ainsi que la finesse des ajouts minéraux sur l'ouvrabilité et le comportement rhéologique ainsi que sur les propriétés à l'état durci des MAP. Cependant, cette recherche peut être complétée par d'autres investigations. A cet effet, nous suggérons :

- D'étudier l'effet de combinaison de ces ajouts minéraux (laitier ou pouzzolane naturelle) avec d'autres additions minérales sur les propriétés des MAP à l'état frais et l'état durci ;
- D'étudier l'influence des finesses d'additions plus élevées que celles adoptées dans notre étude et avoisinant les 800 ou 900 m²/kg;
- D'élargir l'étude à l'état durci et réaliser des essais de durabilité plus approfondis tels que la perméabilité à l'eau, aux gaz et aux ions chlore ;

- D'étudier le comportement des MAP et BAP à base de ces ajouts en milieu agressif.
- De réaliser une étude de microstructure par des essais appropriés tels que le microscope électronique à balayage (MEB) et la diffraction aux rayons X (DRX).
- De prédire le retrait par un modèle numérique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Okamura H., Ouchi M., 2003, 'Self-Compacting Concrete', Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, pp. 5-15.
- [2] Ozawa K., Maekawa K., Okamura H., 1990, 'High performance concrete with high filling capacity', Proceedings of the RILEM Symposium on Admixtures for Concrete, pp. 51-62.
- [3] AFGC, 2008, 'Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants', Documents Scientifiques et Techniques, 64 pages.
- [4] EFNARC, 2005, 'The European guidelines for Self -Compacting Concrete ', The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. WWW.efnarc.org.
- [5] NF EN 12350-8, 2010, 'Essai pour béton frais - Partie 8 : béton autoplaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams', AFNOR, Paris.
- [6] Necira B., 2018, 'Développement des bétons autoplaçants à haute performances : influence de la composition', Thèse de Doctorat de l'Université de Biskra, 176 pages.
- [7] Khayat K.H., Manai K., 1996, 'Les bétons autonivelants : propriétés, caractérisation et applications', Comptes rendus du Colloque sur les bétons autonivelants, Université de Sherbrooke, Canada. pp. 1-30.
- [8] Girish S., Ranganath R.V., Vengala J., 2010, 'Influence of powder and paste on flow properties of SCC', Construction and Building Materials, Vol. 24 , pp. 2481-2488.
- [9] Association Française de Génie Civil (AFGC), 2002, 'Bétons Autoplaçants-Recommandations provisoires', Annales du Bâtiment et des Travaux Publics.
- [10] Sedran T., 1999, 'Rhéologie et Rhéométrie des Bétons. Application aux Bétons Autonivelants', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 224 pages.
- [11] Bethmont S., 2005, 'Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP)', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 166 pages.
- [12] Petersson O., Billberg P., 1999, 'Investigation on blocking of Self-Compacting Concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler', Proceeding Of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, pp. 333-344.

- [13] Chouinard B., 1999, 'Etude des relations entre la rhéologie du béton et sa pompabilité', Mémoire pour l'obtention du grade de maître de science (MSc)', Département de Génie Civil, Université Laval, 228 pages.
- [14] Rizwan S.A., Bier T.A., Ahmad H., 2004, 'Self-Compacting Concrete - A useful technology', Pakistan Engineering Congress, 70th Annual Session Proceedings, pp. 293-318.
- [15] Khayat K., 2000, 'Optimization and Performance of Air-Entrained, Self-consolidating Concrete', ACI Materials Journal, vol. 97, pp. 526-535.
- [16] UTSI S., Emborg M., Carlsward J., 2003, 'Relation with workability and rheological parameters', 3rd international RILM symposium on self-compacting concrete, RILEM publication SARL, pp. 154-164.
- [17] Okamura H., Ouchi M., 1999, 'Self-compacting concrete. Development present use and future', First International RILEM symposium on self-compacting concrete, pp. 3-14.
- [18] Kim B.G., Jiang S., Jolicoeur C., Aitcin P.C., 2000, 'The adsorption behavior of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste', Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 887-893.
- [19] Behim M., Boucetta T.A., 2009, 'Effet des additions micronisées sur l'écoulement des bétons autoplaçants (Laitier de haut fourneau, Filler calcaire et Poudre de verre) ', 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, Oran, Algeria, pp. 423- 430.
- [20] Khayat K., 1999, 'Les Bétons Autonivelants, Les Bétons : Bases et données pour leur Formulation', Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, sous la direction de J. Baron et J-P. Ollivier, 3^e Edition Eyrolles, Paris.
- [21] Menai KH, 1995, 'Etude de l'Effet d'Ajouts chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performances des Bétons Autonivelants', Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées. Spécialité: Génie Civil, Université de Sherbrooke, Canada.
- [22] Edamatsu Y., Ouchi M., 1999, 'A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in Self-Compacting Concrete', Proceeding of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, pp. 121-130.
- [23] Ozawa K., Tangtermsirikul S., Maekawa K., 1992, 'Role of powder materials on filling capacity of fresh concrete', Proceedings of the 4th CANMET/ACI Conference on Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, pp. 121-137.

- [24] Tangtermsirikul S., Van B.K., 1995, 'Blocking criteria for aggregates phase of Selfcompacting high performance concrete', Proceedings of Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering, Bangkok, pp. 58-69.
- [25] De Larrard F., Sedran T., Angot D., 1994, 'Prévision de la compacité des mélanges Granulaires par le model de suspension solide. I : fondements théoriques et calibration du model', Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et Chaussées, Vol. 194, pp.59 -70.
- [26] Adjoudj M., 2015, 'Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton', Thèse en cotutelle, de l'Université de Cergy-Pontoise, France et l'Université Hassiba Ben Bouali De Chlef, Algérie, 162 pages.
- [27] Coussot P., Grossiord J., 2002, 'Comprendre la rhéologie, de la circulation du sang à la prise du béton', EDP Science, Eyrolles, Paris, France, 220 pages.
- [28] Couarraze G., Grossiord J.L., Huang N., 2014, 'Initiation à la rhéologie, Bases théoriques et applications expérimentales', 4^e Edition Lavoisier, Paris, France, 309 pages.
- [29] De Larrard F., 2000, 'Structures granulaires et formulation des bétons', Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, pp. 385-398.
- [30] Ferraris C.F., 1999, 'Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report', Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 104, pp. 461-478.
- [31] Chapdelaine F., 1998, 'Etude sur la mesure de la rhéologie du béton frais', Mémoire pour l'obtention du grade de maître de science (MSc), Université Laval.
- [32] Feys D., Verhoeven R., De Schutter G., 2007, 'Evaluation of time independent rheological models applicable to fresh self-compacting concrete', Applied Rheology, Vol. 17, pp. 1-10.
- [33] De Larrard F., 1998, 'Fresh Concrete: A Hershel- Bulkley Material', Materials and Structures, Vol. 31, pp. 494- 498.
- [34] Feys D., Verhoeven R., De Schutter G., 2008, 'Fresh self-compacting concrete, a shear thickening material', Cement and Concrete Research, Vol. 38, pp. 920- 929.
- [35] Groth P., 2000, 'Steel Fiber Reinforced SCC, Final report of task 6', Brite Euram project (BE 96-3801) - Rational production and improved working environment through using SCC, Doc. No.: RT6-v1.doc.

- [36] Courrazé G., Grossiord J.L., 2000, 'Initiation à la rhéologie', 3^e Edition Lavoisier, Paris, France, 300 pages.
- [37] Dupain R., Lanchon R., Saint Arroman J.C., 1995, 'Granulat, Sols, Ciments et Bétons, caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire', 2^{ème} édition conforme aux normes européennes, Edition Educative, 235 pages.
- [38] Chaib O., Mouli M., Hanifi M., Hamadache M., 2016, 'Etude de l'influence des paramètres de la pouzzolane naturelle sur la résistance mécanique des mortiers à base de ciments composés', Journal of Materials Environnement, Vol.2, pp. 422-428.
- [39] Belaribi O., 2015, 'Durabilité des bétons autoplacants à base de vase et de pouzzolane', Thèse de Doctorat en cotutelle de l'Université Cergy –Pontoise, France et l'Université de Mostaganem, Algérie, 175 pages.
- [40] Aichoube A., Ghrici M., Benaissa A., 2005, 'Effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire', Colloque Méditerranéen sur les Matériaux CMEDIMAT, Oran, Algérie, pp. 6-7.
- [41] Ezziane K., Kadri E. H., Hallal A., Duval R., 2010, 'Effect of mineral additives on the setting of blended cement by the maturity method', Materials and Structures, Vol. 43, pp. 393- 401.
- [42] Colak A., 2003, 'Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan', Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 585-593.
- [43] Belaidi A., Azzouz L., Kadri E., Kenai S., 2012, 'Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete', Construction and Building Materials, Vol. 31, pp. 251- 257.
- [44] Omrane M., Kenai S., Kadri E.H., Ait- Mokhtar A., 2017, 'Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan', Journal of Cleaner Production, Vol. 165, pp. 415-430.
- [45] Bellifa S., 2012, 'Evolution de la porométrie des pâtes autoplacantes', mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister en génie civil de l'Université Aboubekr Belkaid - Faculté de Technologie, Département de Génie Civil, Tlemcen, 75 pages.
- [46] Dada H., Bedlaidi A. S. E., Soualhi H., Kadri E. H., Benabed B., 2021, 'Influence of temperature on the rheological behaviour of eco-mortar with binary and ternary cementitious blends of natural pozzolana and marble powder', Powder Technology, Vol. 384, pp. 223- 235.
- [47] Adjoudj M., Ezziane K., Soualhi H., Kadri E.H., Ngo T., Kaci A., 2014, 'Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer', Construction and Building Materials, Vol. 70, pp. 549-559.

- [48] Ahmadi B., Shekarchi M., 2010, 'Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material', *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, pp. 134-141.
- [49] Dreux G., Festa J., 1998, 'Nouveau guide du béton', 8^e Edition Eyrolles, Paris, 409 pages.
- [50] NF P 15-301, 2015, 'Liants hydrauliques: Ciments courants, composition, spécifications et critères de conformité', AFNOR, Paris.
- [51] Neville A. M., 2000, 'Propriétés des bétons', Edition Eyrolles, Paris, 806 pages.
- [52] Satish C., 1996, 'Waste materials used in concrete manufacturing', Noyes publications, New Jersey, USA, 651 pages.
- [53] Pal S., Mukherjee A., Pathak S., 2003, 'Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete', *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1481-1486.
- [54] RILEM Technical Committee, 2008, 'Final report of RILEM TC 205-DSC: durability of selfcompacting concrete', *Materials and Structures*, Vol. 41, PP. 225-23.
- [55] Boukendakdji O., Kenai S., Kadri E. H., Rouis F., 2009, 'Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 2593-2598.
- [56] Kadri E.H., Duval R., 2002, 'Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars', *ACI Materials Journal*, Vol. 99, pp. 138-142.
- [57] Kouider Djelloul O., 2012, 'Effet du laitier sur le comportement rhéologique du béton autoplaçant', Mémoire de magister, Département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb, Algérie, 157 pages.
- [58] Alaa M.R., 2018, 'An overview on rheology, mechanical properties and durability of high volume slag used as a cement replacement in paste, mortar and concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 187, pp. 89-117.
- [59] Olatokunbo M., Adewale G., David I., Joshua O., John O., 2020, 'Development of high-performance self compacting concrete using eggshell powder and blast furnace slag as partial cement replacement', *Construction and Building Materials*, Vol. 256, pp. 1194-1203.
- [60] Sambangi A., Arunakanthi E., 2021, 'Fresh and mechanical properties of SCC with fly ash and copper slag as mineral admixture', *Materials Today: Proceedings*, Vol. 45, pp. 6687-6693.
- [61] Vivek S., 2021, 'Performance of ternary blend SCC with ground granulated blast furnace slag and metakaolin', *Materials Today: Proceedings*, Vol. 49, pp. 1337-1344.

- [62] Kali P., Dinakar P., Umesh C., 2015, 'Utilization of high volume of industrial slag in self compacting concrete', *Journal of Cleaner Production*, Vol. 256, pp. 1-7.
- [63] Almuwbbber O., Haldenwang R., Mbasha W., Masalova I., 2018, 'The influence of variation in cement characteristics on workability and strength of SCC with fly ash and slag additions', *Construction and Building Materials*, Vol. 160, pp. 258-267.
- [64] Wang H.Y., Lin C.C., 2013, 'A study of fresh and engineering properties of self compacting high slag concrete (SCHSC)', *Construction and Building Materials*, Vol. 42, pp. 132-136.
- [65] Tavasoli S., Nili M., Serpoosh B., 2018, 'Effect of GGBS on the frost resistance of self-consolidating concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 165, pp. 717-722.
- [66] Dadsetan S., Bai J., 2017, 'Mechanical and microstructural properties of self-compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast-furnace slag and fly ash', *Construction and Building Materials*, Vol. 146, pp. 658-667.
- [67] Afshoon I., Sharifi Y., 2019, 'Utilization of micro copper slag in SCC subjected to high temperature', *Journal of Building Engineering*, Vol. 19, pp. 658-667.
- [68] Liu Z., El-Tawil S., Hansen W., Wang W., 2018, 'Effect of slag cement on the properties of ultra-high performance concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 190, pp. 830-837.
- [69] Langaroudi M., Mohammadi Y., 2018, 'Effect of nano-clay on workability, mechanical, and durability properties of self-consolidating concrete containing mineral admixtures', *Construction and Building Materials*, Vol. 191, pp. 619-634.
- [70] Pan Z., Zhou J., Jiang X., Xu Y., Jin R., Ma J., Zhuang Y., Diao Z., Zhang S., Si Q., Chen W., 2019, 'Investigating the effects of steel slag powder on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates', *Construction and Building Materials*, Vol. 200, pp. 570-577.
- [71] Sethy K.P., Pasla D., Sahoo U.K., 2016, 'Utilization of high volume of industrial slag in self compacting concrete', *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, pp. 581-588.
- [72] Kouider Djelloul O., 2018, 'Performance structurale d'un béton autoplaçant à base de granulats recyclés et laitier', *Thèse de Doctorat de l'Université de Blida 1, Algérie*, 200 pages.
- [73] Yahiaoui W., Kenai S., Menadi B., Kadri E.H., 2017, 'Durability of self compacted concrete containing slag in hot climate', *Advances in Concrete Construction*, Vol. 5, pp. 271-288.

- [74] Ahari R.S., Erdem T.K., Ramyar K., 2015, 'Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 75, pp. 89-98.
- [75] Mohan A., Mini K. M., 2018, 'Strength Studies of SCC Incorporating Silica Fume and Ultra Fine GGBS', *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, pp. 23752-23758.
- [76] Faraj R., Far A., Sherwani H., Jafer L., Ibrahim D., 2020, 'Rheological behavior and fresh properties of self-compacting high strength concrete containing recycled PP particles with fly ash and silica fume blended', *Journal of Building Engineering*, Vol. 19, pp. 31831-5.
- [77] Zhou L., Zheng Y., Yu Y., Song G., Huo L., Guo Y., 2020, 'Experimental study of mechanical and fresh properties of HVFA-SCC with and without PP fibers', *Construction and Building Materials*, Vol. 75, pp. 89-98.
- [78] Yang S., Zhang J., An X., Qi B., Shen D., Miao L., 2021, 'Effects of fly ash and limestone powder on the paste rheological thresholds of self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 281, pp. 122560.
- [79] Alyousef R., Benjeddou O., Khadimallah M.A., Mohamed A., Chokri S., 2018, 'Study of the Effects of Marble Powder Amount on the Self-Compacting Concretes Properties by Microstructure Analysis on Cement-Marble Powder Pastes', *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2018, 13 pages.
- [80] Beeralingegowda B., Gundakalle V.D., 2013, 'The effect of addition of limestone powder on the properties of self compacting concrete', *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 2, pp. 2319-8753.
- [81] Cyr M., Mouret M., 2003, 'Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures : Consequences on self -Compacting Concrete design', *Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, Berlin, Allemagne, pp. 241-255.
- [82] Gallias J.L., Kara-Ali R., Bigas J.P., 2000, 'The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes', *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp.1543-1549.
- [83] Ting L., Qiang W., Shiyu Z., 2019, 'Effects of ultra-fine ground granulated blast-furnace slag on initial setting time, fluidity and rheological properties of cement pastes', *Powder Technology*, Vol. 345, pp. 54-63.
- [84] Ma H., Li Z., 2013, 'Realistic pore structure of Portland cement paste: experimental study and numerical simulation', *Computers and Concrete*, Vol.11, pp.317-336.

- [85] Saedi M., Behfarnia K., Soltanian H., 2019, 'The effect of the blaine fineness on the mechanical properties of the alkali activated slag cement', *Journal of Building Engineering*, Vol. 26, pp. 100897.
- [86] Oner M., Erdogdu K., Gunlu A., 2003, 'Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement', *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 463-469.
- [87] Kouider djelloul O., Menadi B., Kenai S., 2015, 'Properties of fresh self-compacting concrete containing slag', *Proceedings of the 1st symposium Knowledge Exchange for Young Scientists (KEYS), Dar es Salaam, Tanzania*, pp. 115-118.
- [88] Park C. K., Noh M. H., Park T. H., 2005, 'Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures', *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 842-849.
- [89] Atzeni C., Massidda L., Sanna U., 1986, 'Relationship between rheology and workability of cement mixes containing blast furnace slag', *Silic Indus*, pp. 5-9.
- [90] Wu X., Roy DM., 1984, 'Slag cement utilization: rheological properties and related characterization', *Cement and concrete research*, Vol. 14, pp. 521-8.
- [91] Benjeddou O., Alwetaishi M., Tounsi M., Alyousef R., Jabbar H., 2021, 'Effects of limestone filler fineness on the rheological behavior of cement – Limestone filler grouts', *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 33, pp. 463-469.
- [92] El-Hilali A., 2009, 'Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP): Influence des fines calcaires et des fibres végétales', *Thèse de Doctorat en Génie Civil, Université de Cergy Pontoise, France*, 183 pages.
- [93] Klug Y., Holschemacher K., 2003, 'Comparison of the hardened properties of Self Compacting and Normal Vibrated Concrete', *3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland*, pp. 596-605.
- [94] Domone P.L., 2007, 'A review of the hardened mechanical properties of self compacting concrete', *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, pp. 1-12.
- [95] Felekoglu B., Yucel Yardimci M., Barandan B., 2003, 'A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete', *Proceedings PRO 33 of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Iceland*, pp. 446-456.
- [96] Chabi S., Mezghiche B., Guettala H., 2004, 'Etude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers', *Courrier du Savoir, N° 05*, pp. 03-08.
- [97] Deboucha W., Leklou N., Khelidj A., Oudjit M., 2017, 'Natural pozzolana addition effect on compressive strength and capillary water absorption of mortar', *Energy Procedia*, Vol. 139, pp. 689-695.

- [98] Senhadji Y., Escadeillas G., Mouli M., Khelafi H., 2014, 'Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar', *Journal of Powder Technology*, Vol. 254, pp. 314-23.
- [99] Dif F., Mouli M., 2018, 'Compressive strength and corrosion evaluation of concretes containing pozzolana and perlite immersed in aggressive environments', *Construction and Building Materials*, Vol. 179, pp. 25-34.
- [100] Omrane M., Rabehi M., 2020, 'Effect of natural pozzolan and recycled concrete aggregates on thermal and physico-mechanical characteristics of self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 247, pp 118576.
- [101] Adekunle S., Ahmad S., Maslehuddin M., Al-Gahtani H., 2015, ' Properties of SCC prepared using natural pozzolana and industrial wastes as mineral fillers', *Cement and Concrete Composites*, Vol. 15, pp. 958-964.
- [102] Kim H., Koh T., Pyo S., 2016, ' Enhancing flowability and sustainability of ultra high performance concrete incorporating high replacement levels of industrial slags', *Construction and Building Materials*, Vol. 123, pp. 153-160.
- [103] Kouider Djelloul O., Menadi B., Wardeh G., Kenai S., 2018, ' Performance of self-compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates and ground granulated blast-furnace slag', *Advances in Concrete Construction*, Vol. 6, pp. 103-121.
- [104] Altoubat S., Badran D., Junaid M., Leblouba M., 2016, 'Restrained shrinkage behavior of Self-Compacting Concrete containing ground-granulated blast-furnace slag', *Construction and Building Materials*, Vol. 129, pp. 98-105.
- [105] Aseel M., Diler S., Al-Hadithi A., 2021, ' Experimental and statistical evaluation of rheological properties of self-compacting concrete containing fly ash and ground granulated blastfurnace slag', *Journal of King Saud University*, Vol. 34, pp. 388-397.
- [106] Dinakar P., Sethy K.P., Sahoo U.C., 2013, 'Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag', *Materials and structures*, Vol. 43, pp. 161-169.
- [107] Menendez G., Irassar F.E., Bonavetti V.L., 2003, 'Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast furnace slag', *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, pp. 61-67.
- [108] Ali-Boucetta T., 2014, 'Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplacants et de hautes performances'. Thèse de doctorat 3^{ème} cycle, Université Badji Mokhtar-Annaba, 210 pages.
- [109] Manjunath R., Mattur C. N., 2018, ' An experimental investigation on self-compacting alkali activated slag concrete mixes', *Journal of Building Engineering*, Vol. 17, pp. 1-12.

- [110] Zhanggen G., Tao J., Jing Z., Xiangkun K., Chen C., Dawn E., 2020, 'Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume', *Construction and Building Materials*, Vol. 231, pp. 117115.
- [111] Boukhelkhal A., Azzouz L., Kenai S., Kadri E.H., Benabed B., 2019, 'Combined effects of mineral additions and curing conditions on strength and durability of self-compacting mortars exposed to aggressive solutions in the natural hot-dry climate in North African desert region', *Construction and Building Materials*, Vol. 197, pp. 307-318.
- [112] Anhad S., Rafat S., 2018, 'Durability properties of self-compacting concrete incorporating metakaolin and rice husk ash', *Construction and Building Materials*, Vol. 176, pp. 323-332.
- [113] Paulo R., Maiara F., Luiz Roberto P., 2019, 'Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 203, pp. 282-293.
- [114] Nguyen V., Leklou N., Aubert J., Mounanga P., 2013, 'The effect of natural pozzolan on delayed ettringite formation of the heat-cured mortars', *Construction and Building Materials*, Vol. 48, pp. 479-484.
- [115] Lawrence P., Cyr M., Ringot E., 2005, 'Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength', *Cement and concrete research*, Vol. 35, pp. 1092-1105.
- [116] Khan, M.I., Alhozaimy A.M., 2005, 'Performance of concrete utilizing the natural pozzolanic material available in the kingdom of Saudi Arabia', *Final Research Report*, Vol. 33, pp. 1-23.
- [117] Hallet V., De Belie N., Pontikes Y. , 2020, 'The impact of slag fineness on the reactivity of blended cements with high-volume non-ferrous metallurgy slag', *Construction and Building Materials*, Vol. 257, pp. 119400.
- [118] Berodier E., Scrivener K., 2014, 'Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C-S-H', *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 97, pp. 3764-3773.
- [119] Benkendorff P., 2006, 'Potential of lead/zinc slag for use in cemented mine backfill, Mineral Process'. *Extractive Metall*, Vol. 115, pp. 171-173.
- [120] Binici H., Temiz H., Kose M., 2007, 'The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice', *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 1122-1128.

- [121] Miura T., Iwaki I., 2000, 'Strength development of concrete incorporating high levels of ground granulated blast-furnace slag at low temperatures', *ACI Material Journal*, Vol. 97, pp. 66–71.
- [122] Turcry Ph., 2004, 'Retrait et fissuration des bétons autoplçants : Influence de la formulation', Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, 223 pages.
- [123] Pineaud A., 2007, 'Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons autoplçants et application à l'industrie de la préfabrication', Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 271 pages.
- [124] Felekoglu B., Turkel S., Baradan B., 2007, 'Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete', *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 1795-1802.
- [125] Elbar M., Senhadji Y., Benosman A., Khelafia H., Mouli M., 2018, 'Effect of thermo-activation on mechanical strengths and chlorides permeability in pozzolanic materials', *Case Studies in Construction Materials*, Vol.8, pp. 459-468.
- [126] Boukendakdji O., 2010, 'Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplçant : optimisation des conditions opératoires', Thèse de Doctorat de l'Université de Saad Dahleb, Algérie, 185 pages.
- [127] Zhao H., Sun X., Wu X., Gao B., 2015, 'The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures', *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, pp. 163-8.
- [128] Lazniewska B., 2013, 'The influence of chemical admixtures on cement hydration and mixture properties of very high performance self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 49, pp. 643-662.
- [129] Sivasundaram V., Malhotra V.M., 1992, 'Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag', *ACI Materials Journal*, Vol. 89, pp. 554-563.
- [130] Khatib J.M., Hibbert J.J., 2005, 'Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin', *Construction and Building Materials*, Vol. 19, pp. 460-472.
- [131] Kannan V., 2018, 'Strength and durability performance of self compacting concrete containing self-combusted ricehusk ash and metakaolin', *Construction and Building Materials*, Vol. 160, pp. 169-179.
- [132] Semcha A., 2006, 'Valorisation des sédiments de dragage: Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug', Thèse de doctorat de l'Université de Reims, France, 167 pages.

- [133] GCI 714, 'Durabilité et réparations du béton', Université de Sherbrooke, pp. 28-62.
- [134] Leemann A., Lura P., Loser R., 2011, 'Shrinkage and creep of SCC – The influence of paste volume and binder composition', *Construction and Building Materials*, Vol. 25 pp. 2283-2289.
- [135] Valcuende M., Marco E., Parra C., Serna P., 2012, 'Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete', *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, pp. 583-592.
- [136] Abdalhmied J., Ashour A., Sheehan T., 2019, 'Long-term drying shrinkage of self-compacting concrete: Experimental and analytical investigations', *Construction and Building Materials*, Vol. 202, pp. 825-837.
- [137] Itim A., Ezziane K., Kadri E.H., 2010, 'Etude des déformations de retrait d'un mortier contenant différentes additions minérales', *Symposium International sur la Construction en Zone Sismique, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie*, pp. 26- 27.
- [138] Chen W., Brouwers H.G., 2012, 'Hydration of mineral shrinkage-compensating admixture for concrete: An experimental and numerical study', *Construction and Building Materials*, Vol. 26, pp.670-676.
- [139] El-Chabib H., Syed A., 2013, 'Properties of self-consolidating concrete made with high volumes of supplementary cementitious materials', *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25, pp. 1579- 1586.
- [140] Min K., Jung H., Yang J., Yoon Y., 2010, 'Shrinkage characteristics of high-strength concrete for large underground space structures', *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 25, pp. 108-113.
- [141] Tadi C., Rao C., 2021, 'Investigating the performance of self-compacting concrete pavement containing GGBS', *Materials Today: Proceedings*, Vol. 49, pp. 2013-2018.
- [142] Cheng S., Shui Z., Sun T., Yu R., Zhang G., Ding S., 2017, 'Effects of fly ash, blast furnace slag and metakaolin on mechanical properties and durability of coral sand concrete', *Applied Clay Science*, Vol. 141, pp. 111–117.
- [143] Sivasundaram V., Malhotra V., 1992, 'Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag', *ACI Material Journal*, Vol.89, pp. 554-563.
- [144] Kristiawan S.A., Aditya M., 2015, 'Effect of high volume fly ash on shrinkage of self-compacting concrete', *Procedia Engineering*, Vol.125, pp. 705-712.
- [145] Pongsakon P., Burachat C., Gritsada S., Natt M., 2020, 'Properties of self-compacting concrete prepared with ternary Portland cement-high volume fly ash-calcium carbonate blends', *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 13, e 00426.

- [146] Herrera A., Esquivel J., Bentz D., Tamez P., 2019, 'Self-compacting concretes using fly ash and fine limestone powder: Shrinkage and surface electrical resistivity of equivalent mortars', *Construction and Building Materials*, Vol. 199, pp. 50–62.
- [147] Choudhary R., Gupta R., Alomayri T., Jain A., Nagar R., 2021, 'Permeation, corrosion, and drying shrinkage assessment of self-compacting high strength concrete comprising waste marble slurry and fly ash, with silica fume', *Structures*, Vol. 33, pp. 971-985.
- [148] Esquinas A., Álvarez J., Jiménez J., Fernández J., 2018, 'Durability of self-compacting concrete made from non-conforming fly ash from coal-fired power plants', *Construction and Building Materials*, Vol. 189, pp. 993-1006.
- [149] Guneyisi E., Gesoglu M., Ozbay E., 2010, 'Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures', *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1878-1887.
- [150] Acker P., 1988, 'Comportement mécanique du béton: Apports de l'approche physico-chimique', *Rapport de Recherche LPC*, N°152, 122 pages.
- [151] Bouasker M., Grondin F., Mounanga P., Khelidj A., 2007, 'Analyse multi-échelles du retrait endogène des matrices cimentaires au jeune âge', 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, pp. 1-7.
- [152] Craeye B., De Schutter G., Desmet B., Vantomme J., Heirman G., Vandewalle L., Cizer O., Aggoun S., Kadri E.H., 2010, 'Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures', *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 908-913.
- [153] Meddah M.S., Tagnit A., 2009, 'Pore structure of concrete with mineral admixtures and its effect on self-desiccation shrinkage', *ACI Materials Journal*, Vol. 106, pp. 241-250.
- [154] Long W., Khayat K.H., Xing F., 2011, 'Autogenous shrinkage of prestressed self consolidating concrete', *Open Civil Engineering Journal*, Vol. 5, pp. 116-123.
- [155] Yilmaz A., Chengsheng O., Surendra P. S., 2007, 'Effect of supplementary cementitious materials on shrinkage and crack development in concrete', *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, pp. 117-123.
- [156] Ayed K., Benaissa A., Vidal T., Pons G., Abidlah A., 2009, 'Etude du comportement différé du BAP, l'influence de la pouzzolane naturelle de Béni Saf sur le retrait du béton autoplaçants', 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran, Algeria, pp. 283-288.
- [157] Lura P., Breugel K.V., Maruyama I., 2001, 'Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete', *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1867-1872.

- [158] Bouasker M., 2007, 'Etude numérique et expérimentale du retrait endogène au très jeune âge des pâtes de ciment avec et sans inclusions', Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 202 pages.
- [159] Wei Y., Hansen W., Biernacki J., Schlangen E., 2011, 'Unified shrinkage model for concrete from autogenous shrinkage test on paste with and without ground-granulated blast-furnace slag', *ACI Materials Journal*, Vol. 108, pp. 13-20.
- [160] Mehdipour I., 2017, 'Characterization and performance of eco and crack-free high-performance concrete for sustainable infrastructure', Thèse de Doctorat de l'Université de Missouri, 399 pages.
- [161] Lee N. K., Jang J. G., Lee H.K., 2014, 'Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages', *Cement and Concrete Composites*, Vol. 53, pp. 239-248.
- [162] Hu X., Shi C., Shi Z., Tong B., Wang D., 2017, 'Early age shrinkage and heat of hydration of cement-fly ash-slag ternary blends', *Construction and Building Materials*, Vol. 153, pp. 857-865.
- [163] Alrifai A., Aggoun S., Kadri A., Kenai S., Kadri E-H., 2013, 'Paste and mortar studies on the influence of mix design parameters on autogenous shrinkage of self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 47, pp. 969-976.
- [164] Piérard J., Dieryck V., Desmyter J., 2005, 'Autogenous shrinkage of self-compacting concrete', *Proceedings of 2nd North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Chicago, pp. 1013-1021.
- [165] Hayder H., Myers J., 2020, 'Creep and shrinkage of SCC', *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties, and Applications*, pp. 131-146.
- [166] Tazawa E., 1992, 'Autogenous shrinkage by self-desiccation in cementitious material', In: *Proceedings of 9th international conference on chemistry of cement*, New Delhi, pp. 712-718.
- [167] Lee K. M., Lee H.K., Lee S.H., 2006, 'Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag', *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1279-1285.
- [168] Tazawa E., Miyazawa S., 1995, 'Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste', *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, pp. 281-287.
- [169] Bjontegaard O., 1999, 'Thermal dilation and autogenous deformation as driving forces to self-induced stresses in high performance concrete', Thèse de Doctorat, NTNU Division of Structural Engineering, Trondheim, Norvège, 256 pages.

- [170] Jensen O. M., Hansen P.F., 1995, 'A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste', *Material and Structures*, Vol. 28, pp. 406-409.
- [171] Morioka M., Hori A., Hagiwara H., Sakai E., Daimon M., 1999, 'Measurement of autogenous length changes by laser sensors equipped with digital computer systems, Autogenous Shrinkage of Concrete', *Proceedings International Workshop, Japan Concrete Institute, Hiroshima*, pp. 203-210.
- [172] Le Roy R., 1996, 'Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances', *Etude et recherche des LPC*, 343 pages.
- [173] Staquet S., Boulay C., D'Aloia L., 2006, 'Autogenous shrinkage of a self-compacting VHPC in isothermal and realistic temperature conditions', 2nd RILEM International symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, RILEM Publication Sarl, Quebec, Canada, pp. 51-80.
- [174] Holt E., Shodet O., 2002 'Self-Compacting Concrete: Early Age Shrinkage', *Technical Report*, pp. 1-26.
- [175] 'Plastic Shrinkage Cracking', *Cement concrete and aggregates Australia*, 2005, pp. 1-4.
- [176] Turcry P., 2003, 'Le retrait plastique des bétons autoplaçants, Etude paramétrique de l'influence de la formulation', XXI^{ème} Rencontres universitaires de Génie Civil, Université de la Rochelle, France, pp. 247-256.
- [177] Song H.W., Byun K.J., Kim S.H., Choi D.H., 2001, 'Early-Age creep and shrinkage in Self-Compacting Concrete incorporating GGBFS', *Proceedings of the second International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete*, COMS Engineering Corporation, Tokyo, pp. 413-422.
- [178] Gram H. E., Piiparinen P., 1999, 'Properties of SCC, Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance', *Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete*, RILEM publications, Stockholm, Sweden, PP. 211-225.
- [179] Turcry P., Loukili A., 2006, 'Evaluation of plastic shrinkage cracking of self-consolidating concrete', *ACI Materials Journal*, Vol. 103, pp. 272-279.
- [180] Baron J., Ollivier J.P., 1992, 'La durabilité des bétons', ENPC, Paris.
- [181] Barluenga G., Palomar I., Puentes J., 2015, 'Hardened properties and microstructure of SCC with mineral additions', *Construction and Building Materials*, Vol. 94, pp. 728-736.
- [182] Cáchová M., Kotátková J., Konáková D., Vejmelková E., Bartonková E., cerný R., 2016, 'Hygic properties of lime-cement plasters with the addition of a pozzolana', *Procedia Engineering*, Vol. 151, pp. 127-132.

- [183] Bouikni A., Swamy R.N., Bali A., 2009, 'Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag', *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 2836-2845.
- [184] Zhu W., Bartos J.M., 2003, 'Permeation properties of self-compacting concrete', *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 921-926.
- [185] Ghrici M., Kenai S., Said-Mansour M., 2007, 'Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements', *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, pp. 542-549.
- [186] Vejmelkova E., Pavlikova M., Kerner Z., Rovnanikova P., Ondracek M., Sedlmajer M., Cerny R., 2009, 'High performance concrete containing lower slag amount: A complex view of mechanical and durability properties', *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 2237-2245.
- [187] Guneyisi E., Gesoglu M., 2008, 'A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag', *Materials and structure*, Vol. 12, pp. 225-230.
- [188] Adam A.A., Molyneaux T.C.K., Patnaikuni I., Law D.W., 2010, 'Strength, sorptivity and carbonation of geopolymer concrete', *Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction*, 1^{ere} Edition Ghafoori, pp. 563-568.
- [189] Hadj Sadok A., 2010, 'Comportement des mortiers et bétons à base de ciments au laitier d'El Hadjar dans des milieux agressifs', Thèse de Doctorat de l'Université de Blida, 191 pages.
- [190] Vivek S.S., Dhinakaran G., 2017, 'Durability characteristics of binary blend high strength SCC', *Construction and Building Materials*, Vol. 146, pp. 1-8.
- [191] Prasanna P.K., Srinivasu K., Ramachandra Murthy A., 2021, 'Strength and durability of fiber reinforced concrete with partial replacement of cement by Ground Granulated Blast Furnace Slag', *Materials Today: Proceedings*, Vol. 47, pp. 5416-5425.
- [192] Hammat S., Menadi B., Kenai S., Khatib J., Kadri E.H., 2021, ' Properties of self-compacting mortar containing slag with different finenesses', *Civil Engineering Journal*, Vol. 7, pp. 840-856.
- [193] Ameer E., 2009, 'Vers une prédiction de la perméabilité au gaz a partir de la composition des matériaux cimentaires', Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle, France.
- [194] Kanellopoulos A., Petrou M.F., Ioannou I., 2012, 'Durability performance of self compacting concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 37, pp. 320-325.

- [195] Da Silva P.R., De Brito J., 2015, 'Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler', *Construction and Building Materials*, Vol. 86, pp. 101-112.
- [196] Ouldkaoua Y., Benabed B., Abousnina R., Kadri E.H., Khatib J., 2020, 'Effect of using metakaolin as supplementary cementitious material and recycled CRT funnel glass as fine aggregate on the durability of green self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 235, PP. 117802.
- [197] Badogiannis E., Tsvivilis S., Papadakis V., Chaniotakis E., 2002, 'The effect of metakaolin on concrete properties', *Proceeding of an International Congress, Challenges of Concrete Construction*, Dundee, Scotland, pp. 81-89.
- [198] Tetsuya I., Shigeyoshi M., Tsuyoshi M., 2008, 'Chloride binding capacity of mortars made with various Portland cements and mineral admixtures', *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 6, pp. 287-301.
- [199] Chandra S., 2013, 'Waste materials used in concrete manufacturing', Noyes, New Jersey, USA.
- [200] Domone P.L.J., Jin J., 1999, 'Properties of mortar for Self-Compacting Concrete', *Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM Publication, Stockholm, Sweden, pp. 109-120.
- [201] Soualhi H., Kadri E.H., Ngo T.T., Bouvet A., Cussigh F., Kenai S., 2014, 'A new vane rheometer for fresh mortar: development and validation', *Applied Rheology*, Vol. 24, pp. 1-7.
- [202] NF EN 196-1, 2016, 'Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances', AFNOR, Paris.
- [203] NF P15-433, 1994, 'Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement', AFNOR, Paris.
- [204] ASTM C1585 – 11, 2012, 'Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic- cement concretes'.
- [205] EFNARC, 2002, 'Specification and Guidelines for self-compacting concrete', *The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*'.
- [206] Grzeszczyk S., Janowska-Renkas E., 2012, 'The influence of small particle on the fluidity of blast furnace slag cement paste containing superplasticizers', *Construction and Building materials*, Vol. 26, pp.411- 416.
- [207] Tangadagi R.B., Manjunatha M., Seth D., Preethi S., 2021, 'Role of mineral admixtures on strength and durability of high strength self compacting concrete: An experimental study', *Materialia*, Vol. 18, pp. 101144.

- [208] Shafigh P., Jumaat M.Z., Bin Mahmud H., Alengaram U.J, 2013, 'Oil palm shell lightweight concrete containing high volume ground granulated blast furnace slag', *Construction and Building Materials*, Vol. 40, pp. 231-238.
- [209] Boukendakdji O., Kadri E.H., Kenai S., 2012, 'Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete', *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, pp.583-590.
- [210] Bessa B.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, 236 pages.
- [211] Zhou Y., Zhang Z., 2021, 'Effect of fineness on the pozzolanic reaction kinetics of slag in composite binders: Experiment and modelling', *Construction and Building Materials*, Vol. 273, pp. 121695.
- [212] Debbih A., Kenai S., Kaci A., Kadri E.H., Mehmet S.K., 2020, 'Assessment of the effect of fine and coarse recycled aggregates and natural pozzolan on various properties of self-compacting concrete', *Materials*, Vol. 73, pp. 36-45.
- [213] Kesseir M., Boukendakdj O., Kadri E.H., Ngo T., 2020, 'Rheological and mechanical performance evaluation of high performance mortar based natural pozzolan', *Journal of Materials and Engineering Structures*, Vol. 7, pp. 467- 476.
- [214] Boukhelkhal D., Boukendakdji O., Kenai S., Bachene S., 2015, 'Effect of mineral admixture type on stability and rheological properties of self-compacting concrete', 33^{èmes} Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, pp. 1-7.
- [215] Şahmaran M., Özkan N., Keskin S.B., Uzal B., Yaman I.O., Erdem T.K., 2008, 'Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts', *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, pp. 930-937.
- [216] Wang Q., Yan P., Han S., 2011, 'The influence of steel slag on the hydration of cement during the hydration process of complex binder', *Science China Technological Sciences*, Vol. 54, pp. 388-394.
- [217] Bayat H., Ramezani pour A.A., Ramezani pour A.M., Farnood Ahmadi1 P., Naghizade1 A., 2020, 'Mechanical and rheological properties of self-compacting concrete containing slag and natural zeolite', *AUT Journal of Civil Engineering*, Vol.4, pp. 81-90.
- [218] Gupta N., Siddique R., 2020, 'Durability Characteristics of Self-Compacting Concrete Made with Copper Slag', *Construction and Building Materials*, Vol. 247, pp.118580.
- [219] Sahoo K., Dhir P.K., Behera S.K., Biswal D.R., 2022, 'Influence of Ground Granulated Blast Furnace Slag on the structural performance of Self Compacting Concrete', *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Vol. 27, pp. 1-23.

- [220] Oluwaseun M., Anthony E., Chinwuba A., Solomon O., 2021, 'Effects of induction-furnace slag on strength properties of self-compacting concrete', *Civil and Environmental Engineering*, Vol. 17, pp. 513-527.
- [221] Pal S.C., Mukherjee A., Pathak S.R., 2003, 'Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete', *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1481-1486.
- [222] Li Z., Zhao X., Tusheng H., Zhao S., Yang L., Xiaoling Q., 2017, 'A study of high-performance slag-based composite admixtures', *Construction and Building Materials*, Vol. 155, pp. 126-136.
- [223] Dai J., Wang Q., Xie C., Xue Y., Duan Y., Cui X., 2019, 'The effect of fineness on the hydration activity index of ground granulated blast furnace slag', *Materials*, Vol. 12, pp. 1-15.
- [224] Sevim O., Baran M., 2021, 'Mechanical and physical properties of cementitious composites containing fly ash or slag classified with help of particle size distribution', *Romanian Journal of Materials*, Vol. 51, pp. 67-77.
- [225] Erdem T.K., Kirca O., 2008, 'Use of binary and ternary blends in high strength concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 22, pp. 1477-1483.
- [226] Elahi A., Basheer P.A.M., Nanukuttan S.V., Khan Q.U.Z., 2010, 'Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials', *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 292-299.
- [227] Laakri M., Oudjit M.N., Saidani-Scott H., 2019, 'Influence of natural pozzolan and blast furnace slag on hydration and physico-mechanical properties of cement', *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, Vol. 10, pp. 112-124.
- [228] Benyahia A., Choucha S., Ghrici M., 2018, 'Influence of limestone dust and natural pozzolan on engineering properties of self-compacting repair mortars', *Frattura ed Integrità Strutturale*, Vol. 45, pp. 135-146.
- [229] Allahverdi A., Mahinroosta M., 2013, 'Mechanical activation of chemically activated high phosphorous slag content cement', *Powder Technology*, pp. 182-188.
- [230] Elzokra A., Emhemed A., Al Houry A., Habib A., Habib M., Malkawi A., 2020, 'Shrinkage Behavior of Conventional and Nonconventional Concrete: A Review', *Civil Engineering Journal*, Vol. 6, pp. 1839-1851.
- [231] Palod R., Deo S.V., Ramtekkar G.D., 2020, 'Effect on mechanical performance, early age shrinkage and electrical resistivity of ternary blended concrete containing blast furnace slag and steel slag', *Materials Today: Proceedings*, Vol. 32, pp. 917-922.

- [232] Zhichao L., Will H., 2016, 'Aggregate and slag cement effects on autogenous shrinkage in cementitious materials', *Construction and Building Materials*, Vol. 121, pp. 429-436.
- [233] Tung-tsan C., Chien-chih W., Benson H., Her-yung W., 2017, 'Seven-day test result assessment of the developed strength in composite cement mortar with slag', *Construction and Building Materials*, Vol. 152, pp. 587-597.
- [234] Lu T., Li Z., Huang H., 2020, 'Effect of supplementary materials on the autogenous shrinkage of cement paste', *Materials*, Vol. 13, pp. 3367.
- [235] Li Y., Bao J., Gu Y., 2010, 'the relationship between autogenous shrinkage and pore structure of cement paste with mineral admixtures', *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1855-1860.
- [236] Humad A., Habermehl-Cwirzen K., Cwirzen A., 2019, 'Effects of fineness and chemical composition of blast furnace slag on properties of alkali-activated binder', *Materials*, Vol. 12, pp. 3447.
- [237] Siad H., 2010, 'Influence du type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants', Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, France, 261 pages.
- [238] Jensen O.M., Hansen P.E., 1996, 'Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume modified cement paste', *ACI Materials Journal*, Vol. 93, pp. 539-543.
- [239] Deboucha W., Oudjit M.N., Bouzid A., Belagraa L., 2015, 'Effect of incorporating blast furnace slag and natural pozzolana on compressive strength and capillary water absorption of concrete', *Procedia Engineering*, Vol. 108, pp. 254-261.
- [240] Boucetta T.A., Behim M., Cassagnabere F., Mouret M., Ayat A., Laifa W., 2021, 'Durability of self-compacting concrete containing waste bottle glass and granulated slag', *Construction and Building Materials*, Vol. 270, pp. 121-133.
- [241] Rahul S., Rizwan A.K., 2017, 'Durability assessment of self compacting concrete incorporating copper slag as fine aggregates', *Construction and Building Materials*, Vol. 155, pp. 617-629.
- [242] Biricik H., Karapinar I.S., 2021, 'Effect of slag fineness and curing conditions on the mechanical properties of alkali-activated blast furnace slag mortars', *International Journal of Engineering Technologies*, Vol. 7, pp. 33-38.
- [243] Menadi B., Kenai S., 2018, 'Influence of natural pozzolana content on self-compacting concrete durability properties', 14th International Conference on Concrete Engineering and Technology, Vol. 431, Kuala Lumpur, Malaysia, 9 pages.

ANNEXE A

Exemple de calcul de la composition de mortier

1. Caractéristiques physique des matériaux

- **Masses volumiques :**

- Ciment : $\rho_c = 3040 \text{ kg/m}^3$
- Sable : $\rho_s = 2530 \text{ kg/m}^3$
- Laitier : $\rho_L = 2850 \text{ kg/m}^3$
- Pouzzolane naturelle : $\rho_p = 2810 \text{ kg/m}^3$
- Superplastifiant : $\rho_{sp} = 1070 \text{ kg/m}^3$
- Eau : $\rho_E = 1000 \text{ kg/m}^3$

- **Coefficient d'absorption du sable : $A_b = 1,7\%$**
- **Le rapport Sable/Mortier : $S/M = 0,50$**
- **Le rapport (par poids) Eau/Liant : $E/L = 0,38$**
- **Le rapport Superplastifiant/Liant : $Sp/L = 1,5$**

Le superplastifiant (MEDAFOW 30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau).

2. Calcul de l'humidité du sable

Un échantillon de sable est pesé, ayant une masse $M_1 = 300 \text{ g}$ (par exemple). L'échantillon est mis dans une étuve à 105°C pendant 8 minutes puis pesé une deuxième fois. Une masse $M_2 = 295 \text{ g}$ est obtenue. L'humidité du sable μ_s est calculée par la formule :

$$\mu_s = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

3. Calcul du dosage des constituants du mortier

- **Le ciment :** Le pourcentage en volume du ciment $C\%$:

$$C_{vol}(\%) = \frac{(1 - S/M)}{(1 + E/C_{par\ volume})} \times 100$$

La quantité de ciment C en **kg**:

$$C(\text{kg}) = \frac{V \times E / C_{par\ volume}}{100} \times \rho_c$$

- **Le Sable** : La quantité du sable en kg S :

$$S(\text{kg}) = \left(1 + \frac{\text{Correction}}{100}\right) \times \left(\frac{V \times S / M \times \rho_s}{100}\right)$$

- **Le superplastifiant**: La quantité du superplastifiant est Sp :

$$Sp(\text{kg}) = \frac{\%Sp \times C}{100}$$

- **L'eau** : L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties. une première partie E_1 , qui est de 70% de la quantité d'eau globale. Cette dernière est rajoutée lors du malaxage durant la première minute. La deuxième quantité E_2 (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant et ajoutée au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage.

Le pourcentage d'eau en volume : $\% E_{vol}$

$$\%E_{vol} = \frac{(1 - S/M) \times 100 \times E / C_{par\ volume}}{(1 + E / C_{par\ volume})}$$

