

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA**

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**

Département de Génie Civil

**MEMOIRE DE MAGISTER**

En Génie Civil

Spécialité : Construction

**INFLUENCE DU LAITIER ET DE LA POUZZOLANE SUR LE  
RETRAIT DES MORTIERS AUTOPLACANTS**

Par

**Sihem HAMMAT**

Devant le jury composé de:

M.BENSAIBI	Professeur, Université Saad Dahleb-Blida	Président
O.BOUKENDAKDJI	Maitre de conférences, Université de Médea	Examineur
A.BOUIKNI	Maitre de conférences, Université Saad Dahleb-Blida	Examineur
B. MENADI	Maitre de conférences, Université Saad Dahleb Blida	Rapporteur
S. KENAI	Professeur, Université Saad Dahleb-Blida	Co- Rapporteur

Blida, Avril 2012

## RESUME

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons extrêmement fluides qui se mettent en place sans vibration. Ils sont caractérisés par la présence d'ajouts minéraux qui influencent considérablement leur comportement à l'état frais et à l'état durci. Cette étude a pour principal objectif l'analyse de l'influence du laitier d'El Hadjar et de la pouzzolane de Béni-Saf ainsi que l'effet de leurs finesses sur le retrait des mortiers autoplaçants (MAP). L'influence des ajouts minéraux sur la résistance mécanique en compression est également analysée. Au total, dix huit formulations ont été étudiées. Chaque ajout a été broyé à trois finesses différentes 3500, 4200 et 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Le ciment est substitué par trois pourcentages d'additions : 15, 30 et 50%. Les résultats ont montré que la substitution du ciment par les additions minérales (laitier, pouzzolane) engendre une diminution du retrait total (à 28 jours d'âge) et de la résistance mécanique en compression des mortiers autoplaçants et ceci quelque soit la finesse de l'ajout. Par ailleurs, l'étude a révélée que l'augmentation de la finesse de la pouzzolane génère une augmentation du retrait total et une amélioration de la résistance en compression. Cependant, l'augmentation de la surface spécifique du laitier diminue que légèrement le retrait total et la résistance en compression des mortiers autoplaçants.

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

## ABSTRACT

Self- compacting concretes are extremely fluid concretes that can be placed into formwork without vibration. They are characterized by the presence of mineral additions which influence considerably their behavior in fresh and hardened states. The main objective of this work is the analysis of the influence of the slag of El – Hadjar and the pozzolana of Béni – Saf and the effect of their fineness on the shrinkage of self-compacting mortars. The influence of the mineral additions on the compressive strength is also analyzed. Eighteen formulations were studied. Each addition was ground to three finenesses 3500, 4200 and 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . The cement is substituted by three different percentages of additions: 15, 30 and 50%. The results gives that the substitution of cement by mineral additions (slag and natural pozzolana) generates a reduction of the total shrinkage (at 28 days) and compressive strength of self-compacting mortars whatever the fineness of the addition. The study has also shown that the increase of the fineness of the natural pozzolana gives an increase of the total shrinkage and of the compressive strength. However, the increase of the fineness of the slag decreases slightly the shrinkage and the compressive strength of the self compacting mortars.

**Keywords:** Self-compacting mortar, Shrinkage, Resistance, Slag, Natural Pozzolana, Fineness.

## ملخص

الخرسانة المرصوصة ذاتيا هي خرسانة عالية السيولة ، تأخذ مكانها دون حاجة لأي نوع من أنواع عمليات الرص. هـ ذا النوع من الخرسانة يتميز باحتوائه على الإضافات المعدنية التي تؤثر بصفة كبيرة علي خاصيات الخرسانة في حالتها المرنة و الصلبة. الهدف الرئيسي من هذا البحث هو دراسة تأثير فضلات الأفران المتوفرة بالحجار و البوزولان المتواجدة في منطقة بني صاف و أيضا تأثير درجة نعومة هذه الإضافات المعدنية على انكماش الخرسانة. كما تم دراسة تأثير الإضافات المعدنية على مقاومة الضغط. تمت دراسة ثمانية عشر تركيبة حيث تم طحن الإضافات المعدنية المستعملة إلى ثلاثة درجات نعومة مختلفة : 3500 و 4200 و 5000 سم<sup>2</sup>/غ. تم إدراج مواد الإضافات المعدنية في خليط الخرسانة كبديل للإسمنت و هـ ذا بنسب ثلاثة : 15 و 30 و 50 في المئة. أظهرت النتائج أن استبدال الإسمنت ب الإضافات المعدنية ( فضلات الأفران و البوزولان الطبيعي) يؤدي إلى انخفاض انكماش الخرسانة (في اليوم الثامن و العشرون) و تناقص مقاومة الضغط و هـ ذا بغض النظر عن نعومة المواد المضافة. زيادة على ذلك، كشفت الدراسة التجريبية أن ارتفاع درجة نعومة البوزولان الطبيعي يؤدي إلى ارتفاع انكماش الخرسانة و مقاومة الضغط. بينما لوحظ أن ارتفاع نعومة فضلات الأفران يؤدي إلى انخفاض طفيف في انكماش و مقاومة ضغط الخرسانة المرصوصة ذاتيا .

**الكلمات المفتاح :** الخرسانة المرصوصة ذاتيا ، اللانكماش، المقاومة، فضلات الأفران ، البوزولان الطبيعي، النعومة

## REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent, en premier lieu, à mes deux responsables de thèse, Monsieur Belkacem MENADI, Maître de conférences à l'université de Blida et à Monsieur Said KENAI, Professeur à l'université de Blida, pour leur précieuse aide qui a permis de réaliser ce travail. Je les remercie pour leur disponibilité, leurs conseils et orientations ainsi pour leurs grandes qualités humaines. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance. Espérant avoir l'occasion de travailler avec eux dans des futurs travaux.

Je voudrais exprimer ma gratitude pour toute l'aide apportée, vers Monsieur BOUKENDAKDJI, Monsieur OMRANE et Monsieur HADJ SADOK.

Je souhaiterais également remercier, Monsieur HOUARI, Chef de département de chimie industrielle de nous avoir ouvert les portes du laboratoire des matériaux de son département.

J'adresse aussi mes remerciements au Directeur et à tous les membres de la cimenterie de Meftah qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je voudrais également remercier toute l'équipe de GRANITEX et de LAFARGE qui ont mis à ma disposition des produits nécessaires pour l'élaboration de mon travail de recherche.

Je tiens à remercier aussi tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail :

- Monsieur M.BENSAIBI, Professeur, Université Saad Dahleb-Blida.
- Monsieur O.BOUKENDAKDJI, Maître de conférences, Université de Médea.
- Monsieur A.BOUIKNI, Maître de conférences, Université Saad Dahleb-Blida.

Je remercie enfin tous les membres de ma famille, particulièrement mes parents qui m'ont aidé et soutenu tout au long de ce travail.



1.7.2. Résistance à la traction .....	29
1.7.3. Module d'élasticité .....	30
1.8. Durabilité des BAP .....	31
1.8.1. Perméabilité aux gaz .....	31
1.8.2. Absorption capillaire .....	32
1.8.3. Diffusion des ions chlores .....	33
1.8.4. Carbonatation .....	35
1.9. Conclusion .....	37

## **Chapitre 2 RETRAIT DES BETONS AUTOPLACANTS**

2.1. Généralités .....	38
2.2. Etat de l'eau dans la pâte de ciment hydraté .....	38
2.3. Retrait et fissuration des BAP .....	39
2.4. Retrait plastique .....	39
2.5. Retrait endogène .....	46
2.5.1. Définition et mécanisme du retrait endogène .....	46
2.5.2. Paramètres influençant le retrait endogène .....	48
2.6. Retrait de dessiccation .....	57
2.7. Retrait thermique .....	62
2.8. Retrait de carbonatation .....	62
2.9. Conclusion .....	62

## **Partie II PROCEDURE EXPERIMENTALE**

### **Chapitre 3 MATERIAUX, FORMULATION ET METHODES D'ESSAIS**

3.1. Généralités .....	64
3.2. Caractéristiques des matériaux utilisés .....	64
3.2.1. Le Ciment .....	64
3.2.2. Les Additions minérales .....	65
3.2.2.1. La pouzzolane naturelle .....	66
3.2.2.2. Le laitier .....	67
3.2.3. Le sable .....	68
3.2.4. Le superplastifiant .....	69

3.2. 5. L'eau de gâchage .....	70
3. 3. Formulation du mortier autoplaçant .....	70
3. 4. Méthodes d'essais .....	71
3.4. 1. Les essais à l'état frais .....	72
3.4.1.1. Essai d'étalement au Mini-Cône .....	72
3.4.1.2. Essai à l'entonnoir en V (V- Funnel) .....	72
3.4. 2. Les essais à l'état durci .....	73
3.4.2.1. Résistance à la compression .....	73
3.4.2.2. Essai de retrait total .....	74
3. 5. Récapitulatif du programme expérimental .....	75
<b>Chapitre 4      RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS</b>	
4.1. Généralités .....	76
4.2. Optimisation du dosage en superplastifiant (Sp/L) .....	76
4.2.1. Essai d'étalement au mini-cône .....	76
4.2.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel) .....	77
4.3. Influence de la pouzzolane sur l'ouvrabilité des MAP .....	79
4.3.1. Essai d'étalement au mini-cône .....	80
4.3.2. Essai d'écoulement au V-Funnel .....	81
4.4. Influence du laitier sur l'ouvrabilité des MAP .....	83
4.4.1. Essai d'étalement au mini-cône .....	83
4.4.2. Essai d'écoulement au V-Funnel .....	85
4.5. Essais à l'état durci .....	86
4.5.1. Résistance à la compression .....	86
4.5.1.1. Influence de la pouzzolane naturelle .....	87
4.5.1.2. Influence du laitier .....	92
4.5.2. Mesure du retrait (total) .....	96
4.5.2.1. Influence de la pouzzolane sur le retrait total .....	97
4.5.2.2. Influence du laitier sur le retrait total .....	103
4.6. Conclusion .....	108
<b>CONCLUSION GENERALES ET PERSPECTIVES</b> .....	109
<b>ANNEXE A : Méthode de calcul de la composition du mortier</b> .....	112
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	114

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Composition d'un béton ordinaire et d'un BAP .....	16
Figure 1.2 : Blocage des granulats au droit des armatures .....	18
Figure 1.3: A : Etat initial (Avant l'action du superplastifiant) B : Défloculation des grains de ciment .....	20
Figure 1.4: Effet des superplastifiants sur l'étalement et la viscosité des pâtes cimentaires .....	21
Figure 1.5 : Cône et entonnoir pour mesurer l'étalement et le temps d'écoulement des mortiers	23
Figure 1.6 : Evolution de la résistance en compression des BAP en fonction de E/C .....	26
Figure 1.7 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) ...	27
Figure 1.8: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP .....	28
Figure 1.9: Résistance à la compression en fonction du pourcentage de pouzzolane et de laitier .....	28
Figure 1.10 : Développement de la résistance à la traction des BAP à différents âges .....	29
Figure 1.11 : Comparaison des modules élastiques théoriques des BAP et des BV avec leurs valeurs expérimentales .....	30
Figure 1.12 : Modules élastiques des BAP et des BV .....	30
Figure 1.13 : Perméabilité à l'oxygène des bétons .....	32
Figure 1.14 : Absorption capillaire des BAP et d'un BV .....	33
Figure 1.15 : Coefficient de diffusion des ions chlorures .....	34
Figure 1.16 : Progression de la carbonatation .....	35
Figure 1.17 : Profondeur de carbonatation à l'âge de 42 mois .....	36
Figure 1.18 : Profondeur de carbonatation des BAP et des BV .....	37
Figure 2.1 : Etat de l'eau dans la pâte de ciment .....	39
Figure 2.2: Fissuration à l'état frais, en termes de retrait et capacité de déformation .....	40
Figure 2.3: Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment .....	41
Figure 2.4: Schéma d'un ménisque capillaire non saturé (1 – phase liquide, 2 - phase gazeuse, 3 phases Solides) .....	41
Figure 2.5 : Schématisation d'un ménisque au cours du séchage .....	43
Figure 2.6 : Retrait plastique des formules de BAP et de BO dérivés .....	43
Figure 2.7: Retrait plastique de BAP et de béton vibré .....	44
Figure 2.8 : Effet du dosage de superplastifiant sur le retrait maximal .....	45
Figure 2.9 : Effet de l'addition de cendres volantes sur le retrait maximal .....	46
Figure 2.10: Présentation du volume apparent et du volume absolu .....	47
Figure 2.11 : Retrait chimique et retrait endogène d'une pâte de ciment .....	47

	9
Figure 2.12 : Influence du rapport E/C sur l'humidité relative .....	48
Figure 2.13 : Influence du rapport E/C sur le retrait endogène .....	49
Figure 2.14: Influence du rapport E/C, adjuvant et fumée de silice sur le retrait endogène .....	50
Figure 2.15: Influence de la finesse du ciment sur le retrait endogène .....	51
Figure 2.16: Influence de la composition du ciment sur le retrait endogène .....	51
Figure 2.17: Influence de la fumée de silice sur le retrait endogène .....	52
Figure 2.18: Influence de la fumée de silice sur le retrait endogène .....	53
Figure 2.19: Influence des cendres volantes sur le retrait endogène .....	53
Figure 2.20 : Evolution du retrait endogène des mortiers au laitier .....	54
Figure 2.21 : Evolution du retrait endogène des mortiers à la pouzzolane naturelle .....	55
Figure 2.22 : Evolution du retrait endogène des mortiers au calcaire .....	55
Figure 2.23 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP .....	56
Figure 2.24 : Evolution du retrait des différents BAP (RT: Retrait total, RE : Retrait endogène) .....	57
Figure 2.25: Relation entre la perte d'eau, l'humidité relative et le retrait de séchage de la pâte de ciment hydraté .....	58
Figure 2.26: Retrait de séchage de deux BAP et d'un béton vibré .....	58
Figure 2.27 : Comparaison du retrait de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP ....	59
Figure 2.28: Retrait de dessiccation des BAP (SCC) et des BV de même rapport E/C ....	60
Figure 2.29: Evolution du retrait de dessiccation des mortiers au laitier .....	60
Figure 2.30: Evolution du retrait de dessiccation des mortiers à la pouzzolane naturelle ..	61
Figure 2.31: Evolution du retrait de dessiccation des mortiers au calcaire .....	61
Figure 3.1 : Broyeur à boulets .....	65
Figure 3.2 : Variation de la finesse des ajouts minéraux en fonction du temps de broyage .....	66
Figure 3.3 : Pouzzolane naturelle : (a) avant broyage, (b) après broyage .....	67
Figure 3.4 : Laitier de haut fourneau : (a) avant broyage, (b) après broyage. ....	68
Figure 3.5 : Sable de Beghlia .....	68
Figure 3.6 : Courbe granulométrique du sable.....	69
Figure 3.7 : Malaxeur à mortier. ....	71
Figure 3.8 : Essai d'étalement pour mortier .....	72
Figure 3.9 : Essai à l'entonnoir en V pour mortier .....	73
Figure 3.10 : Dispositif pour l'essai de compression.....	74
Figure 3.11 : Dispositif pour l'essai de retrait .....	74

	10
Figure 3.12 : Organigramme résumant le programme expérimental de notre recherche ...	75
Figure 4.1 : Variation de l'étalement en fonction de la teneur en superplastifiant .....	77
Figure 4.2: Variation du temps d'écoulement en fonction de la teneur en superplastifiant	78
Figure 4.3: Variation de l'étalement du mortier à base de pouzzolane .....	80
Figure 4.4: Aspect du mortier autoplaçant à base de pouzzolane .....	81
Figure 4.5: Variation du temps d'écoulement du mortier à base de pouzzolane .....	82
Figure 4.6: Variation de l'étalement du mortier à base de laitier .....	83
Figure 4.7: Aspect du mortier autoplaçant à base de laitier .....	84
Figure 4.8: Variation du temps d'écoulement du mortier à base de laitier .....	85
Figure 4.9: Variation de la résistance en compression des MAP (SSB : 3500 cm <sup>2</sup> /g) .....	88
Figure 4.10: Variation de la résistance en compression des MAP (SSB : 4200 cm <sup>2</sup> /g) .....	89
Figure 4.11: Variation de la résistance en compression des MAP (SSB : 5000 cm <sup>2</sup> /g) .....	89
Figure 4.12: Variation de la résistance en compression en fonction du temps des mortiers à base de 15% de pouzzolane .....	91
Figure 4.13: Variation de la résistance en compression en fonction du temps des mortiers à base de 30% de pouzzolane .....	91
Figure 4.14: Variation de la résistance en compression des MAP (SSB : 3500 cm <sup>2</sup> /g) .....	93
Figure 4.15: Variation de la résistance en compression des MAP (SSB : 4200 cm <sup>2</sup> /g) .....	94
Figure 4.16: Variation de la résistance en compression des MAP (SSB : 5000 cm <sup>2</sup> /g) .....	94
Figure 4.17: Variation de la résistance en compression en fonction du temps des mortiers à base de 15% de laitier .....	95
Figure 4.18: Variation de la résistance en compression en fonction du temps des mortiers à base de 30% de laitier .....	96
Figure 4.19: Evolution du retrait total des MAP à base de pouzzolane (SSB : 3500 cm <sup>2</sup> /g)	98
Figure 4.20: Evolution du retrait total des MAP à base de pouzzolane (SSB : 4200 cm <sup>2</sup> /g)	99
Figure 4.21: Evolution du retrait total des MAP à base de pouzzolane (SSB : 5000 cm <sup>2</sup> /g)	100
Figure 4.22: Evolution du retrait total des MAP à base de 15% de pouzzolane .....	102
Figure 4.23: Evolution du retrait total des MAP à base de 30% de pouzzolane .....	102
Figure 4.24: Evolution du retrait total des MAP au laitier (SSB : 3500 cm <sup>2</sup> /g) .....	104
Figure 4.25: Evolution du retrait total des MAP au laitier (SSB : 4200 cm <sup>2</sup> /g) .....	105
Figure 4.26: Evolution du retrait total des MAP au laitier (SSB : 5000 cm <sup>2</sup> /g) .....	105
Figure 4.27: Evolution du retrait total des MAP à base de 15% de laitier .....	107
Figure 4.28: Evolution du retrait total des MAP à base de 30% de laitier .....	107

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Composition des BAP SCC1 et SCC2.....	59
Tableau 3.1 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.....	64
Tableau 3.2 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment.....	64
Tableau 3.3 : Caractéristiques chimiques de la pouzzolane de Béni-Saf .....	66
Tableau 3.4 : Caractéristiques chimiques du laitier d'El Hajar .....	67
Tableau 3.5 : Caractéristiques du sable de Beghlia .....	69
Tableau 3.6 : Caractéristiques du superplastifiant .....	70
Tableau 4.1: Variation de l'étalement en fonction du dosage en superplastifiant .....	76
Tableau 4.2 : Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant .....	77
Tableau 4.3 : Optimisation des mortiers étudiés .....	78
Tableau 4.4 : Composition des mortiers étudiés .....	79
Tableau 4.5: Résultats d'essais à l'état frais d'un mortier à base de pouzzolane .....	79
Tableau 4.6: Résultats d'essais à l'état frais d'un mortier à base de laitier .....	83
Tableau 4.7 : Résultats de l'essai de résistance des mortiers à base de pouzzolane .....	87
Tableau 4.8 : Résultats de l'essai de résistance des mortiers à base de laitier .....	92
Tableau 4.9 : Retrait des mortiers autoplçants à base de pouzzolane .....	97
Tableau 4.10 : Retrait des mortiers autoplçants à base de laitier .....	103

## LISTE DES ABREVIATIONS ET DES NOTATIONS

BAP	Béton autoplaçant.
BO	Béton ordinaire.
BV	Béton vibré.
C <sub>3</sub> A	Aluminate tricalcique.
C <sub>2</sub> S	Silicate bicalcique.
C <sub>3</sub> S	Silicate tricalcique.
C <sub>4</sub> AF	Alumino-Ferrite- Tétracalcique.
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hydroxyde de calcium ou portlandite.
CaCO <sub>3</sub>	Carbonate de Calcium ou Calcaire.
CEMI	Ciment portland.
cm	Centimètre.
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de Carbone.
C-S-H	Silicate de Calcium hydraté.
d	Diamètre d'étalement d'un mortier.
d <sub>0</sub>	Diamètre inférieur du mini – cône pour mortier.
d <sub>i</sub>	Taille des grains i.
D <sub>max</sub>	Diamètre maximal des granulats.
DP	Gradient de pression entre la phase gazeuse et la phase liquide.
E/C	Rapport Eau sur Ciment.
E/L	Rapport Eau sur Liant (Ciment + additions minérales).
E/P	Rapport Eau sur Poudre.
G/S	Rapport Gravillon sur Sable.
h	Humidité relative dans le pore capillaire.
kg/m <sup>3</sup>	Kilogramme par mètre cube.
l/m <sup>3</sup>	Litre par mètre cube.
M	Masse d'une mole d'eau.
MAP	Mortier autoplaçant.
mm	Millimètre.
MPa	Méga pascal.
r	Rayon d'un pore capillaire où existe le ménisque.

R	Constante des gaz parfaits.
Rb	Risque de blocage du béton.
Rm	Vitesse relative d'écoulement d'un mortier au mini – entonnoir.
s	Secondes.
SCC	Self- Compacting Concrete.
SSB	Surface spécifique de Blaine.
t	Temps.
T	Température de l'eau capillaire.
v	Volume massique de l'eau.
Va	Volume absolu du ciment anhydre.
$V_{crit,i}$	Volume critique en granulats de taille $d_i$ .
Ve	Volume absolu de l'eau consommé.
Vh	Volume absolu des hydrates.
$V_i$	La proportion volumique des granulats de taille $d_i$ .
$\Delta V$	Variation de volume.
$\Gamma_m$	Étalement relatif d'un mortier au mini- cône.
$\mu\text{m/m}$	Micromètre par mètre.
$\theta$	Angle de mouillage.
$\mu\text{m}$	Micromètre.
$\sigma$	Tension superficielle de l'eau.
$\rho_{abs}$	Masse volumique absolue.
$\rho_{app}$	Masse volumique apparente.

## INTRODUCTION GENERALE

Les bétons autoplaçants ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon. Ce sont des bétons très fluides qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité sans recours à la vibration. Leur très grande fluidité à l'état frais leur procure de multiples avantages en termes de facilité de mise en oeuvre et d'impact socio-économique, avec une réduction significative de la pénibilité du travail des ouvriers en charge de bétonnage et une suppression du bruit généré par les habituels appareils de vibration utilisés pour compacter les bétons de fluidité ordinaire. Seulement, la fluidité n'est pas la seule propriété recherchée ; Il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout de superplastifiants, de fines et/ou l'emploi d'agents de viscosité.

Les bétons autoplaçants se caractérisent par une composition particulière. Ils possèdent une grande quantité de fines donc un volume de pâte important et un faible rapport eau/liant. En conséquence, le retrait des bétons autoplaçants est susceptible d'être élevé.

Le retrait peut être défini comme la variation dimensionnelle d'un élément de béton libre de toute sollicitation mécanique extérieure dans une ambiance thermodynamique constante. Le retrait des bétons autoplaçants dépend de plusieurs paramètres tels que la composition du béton, la taille de ses constituants ainsi que les conditions extérieures de conservation. Le retrait du béton peut avoir différentes origines d'où on peut distinguer les différents types de retrait ; principalement le retrait endogène due aux réactions d'hydratation du ciment et le retrait de dessiccation due au séchage du béton résultant des échanges hydriques avec le milieu extérieur.

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer l'influence des ajouts minéraux à savoir le laitier et la pouzzolane naturelle ainsi que leur finesse sur le retrait total des mortiers autoplaçants. Une étude de l'influence des ajouts (laitier et pouzzolane naturelle) sur la résistance mécanique en compression est également réalisée.

La structure du mémoire est comme suit :

Après une introduction générale, une étude bibliographique est présentée en deux chapitres. Le premier chapitre du mémoire est consacré à la définition des bétons autoplaçants ainsi que le rôle de ses composants permettant d'obtenir des matériaux fluides et stables. Les différentes méthodes de leur formulation ainsi que leurs propriétés à l'état frais sont abordées. Ce premier chapitre se termine par la présentation des propriétés des BAP à l'état durci notamment leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques liées à la durabilité. Le deuxième chapitre est dédié à l'analyse bibliographique des déformations des bétons autoplaçants. Ce chapitre analyse les différents types de retraits avec leurs mécanismes et les facteurs les influençant. Une attention particulière est portée à l'effet de la présence du laitier et la pouzzolane sur le retrait de dessiccation et d'autodessiccation des bétons autoplaçants.

Le troisième chapitre décrit les matériaux utilisés et les différents essais de caractérisation du MAP à l'état frais et à l'état durci.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats expérimentaux des essais de retrait (Retrait total) et de résistance en compression des mortiers autoplaçants. Les effets des paramètres étudiés (Types d'ajouts et leurs finesses) sont analysés.

Enfin, des conclusions générales sont données qui résument les principaux résultats obtenus ainsi que des recommandations pour les futurs travaux.

# **Partie I**

## **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

# **Chapitre 1**

## **BETONS AUTOPLACANTS : FORMULATION, PROPRIETES MECANIQUES ET DURABILITE**

# CHAPITRE 1

## BETONS AUTOPLACANTS : FORMULATION, PROPRIETES MECANQUES ET DURABILITE

### 1.1. Généralités

Dans ce chapitre, on présente une revue bibliographique sommaire sur la formulation ainsi que sur les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci (résistances et durabilité).

### 1.2. Définition

Les bétons autoplaçants sont des bétons très fluides, stables et homogènes, qui se mettent en place sous l'effet de leur poids propre sans recours à la vibration. Ces bétons sont spécialement adéquats pour les constructions de géométrie complexe et difficilement accessible et pour le bétonnage en milieux fortement ferrailés. La fluidité requise d'un BAP est obtenue par l'incorporation des superplastifiants et éventuellement d'un agent de viscosité pour limiter le problème de ségrégation et de ressuage. Les BAP contiennent un volume de pâte (ciment + additions + adjuvants + eau efficace + air) important, de l'ordre de 330 à 400 l/m<sup>3</sup>, dont le rôle est d'écarter les granulats les uns des autres, favorisant ainsi l'écoulement du béton [1]. Par ailleurs, les compositions de BAP comportent une quantité de fines supérieure à celle contenue dans un béton traditionnel (Figure 1.1). Elle est de l'ordre de 500 kg/m<sup>3</sup> [1- 2] et ceci dans le but de garantir une maniabilité suffisante tout en réduisant les risques de ségrégation et de ressuage [3].

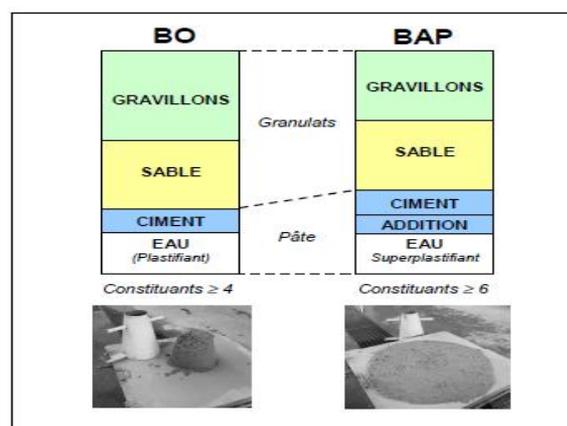


Figure 1.1 : Composition d'un béton ordinaire et d'un BAP [4].

### 1.3. Avantages et inconvénients des BAP

Les bétons autoplaçants offrent les avantages suivants :

- Réduction des nuisances sonores dans et au voisinage du chantier,
- Réduction de la pénibilité du travail en éliminant les taches de vibration,
- Amélioration de la sécurité des ouvriers en supprimant les postes de travail à risque,
- Réduction des délais de réalisation du chantier,
- Réduction du coût de la main d'œuvre liée à l'absence de vibration,
- Réduction des besoins en matériel,
- Amélioration de la qualité des parements,
- Réalisation de projets de forme complexe ou à forte densité de ferrailage,
- Possibilité de couler des voiles sur de grandes hauteurs sans reprises de bétonnage,
- Limitation des points de bétonnage.

Cependant, les bétons autoplaçants présentent quelques inconvénients :

- La nécessité d'une étroite collaboration entre le fabricant et l'entrepreneur dans le but d'assurer la précision de la fluidité des BAP. En effet, un type de fluidité ou un autre est choisi selon le type de coffrage, sa disposition ou sa taille ;
- L'utilisation des BAP peut engendrer des dépenses supplémentaires liées à leur hyperfluidité et donc au temps de prise qui est plus important. En effet, les coffrages sont réutilisés à plusieurs reprises mais ces derniers sont monopolisés plus longtemps à cause de la prise qui est très lente ;
- Accroissement du coût du matériau, par la présence des nouveaux adjuvants et des différentes d'additions minérales ;
- Il faut également tenir compte des conditions météorologiques. Surtout pour le gel, puisque le béton est plus humide et y est beaucoup plus sensible.

### 1.4. Influence des paramètres de formulation sur les propriétés des BAP

Les constituants communs des bétons ordinaires et des bétons autoplaçants sont : le ciment, l'eau et les granulats. Outre ces composants de base, les BAP nécessitent l'emploi d'adjuvants fluidifiants, d'additions minérales et parfois d'un agent de viscosité.

### 1.4.1. Les granulats

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés, de forme généralement arrondie, qui sont obtenus par criblage des matériaux alluvionnaires. Ils peuvent être aussi confectionnés avec des granulats concassés, de forme plus ou moins anguleuse, obtenus par concassage des roches massives.

La forme des granulats a une grande importance. En effet, 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 [5]. Par contre, plus les granulats sont sphériques, plus les frictions internes diminuent. Par conséquent, l'écoulement est favorisé et les risques de blocage sont réduits.

Selon PETERSSON et al. [6], la granulométrie et en particulier la dimension maximale des granulats jouent un rôle important lors de l'élaboration d'un béton autoplaçant. 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 barres lors du coulage (Figure 1.2).

OKAMURA et al. [7] conseillent de limiter la teneur en gros granulats afin d'augmenter la résistance à la ségrégation des bétons frais. D'autre part, la quantité de sable contenue dans le mortier ne doit pas être trop importante puisque cela augmente la résistance à l'écoulement et la viscosité. Cependant, cette dernière doit être relativement faible pour que le BAP s'écoule avec un débit important. En général, ces exigences conduisent à adopter un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1 [1-8].

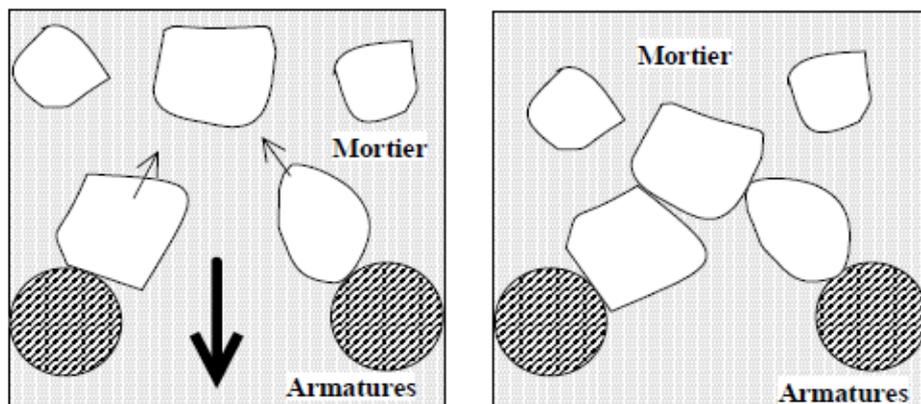


Figure 1.2 : Blocage des granulats au droit des armatures [1].

### 1.4.2. L'eau de gâchage

L'eau ne doit pas contenir de composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures. L'eau du réseau public, les eaux recyclées de gâchage et de lavage peuvent convenir. Néanmoins l'utilisation des eaux recyclées doit être limitée afin d'éviter d'éventuels effets néfastes sur les propriétés des BAP.

### 1.4.3. Les additions minérales

L'introduction des ajouts dans la confection des bétons améliore aussi bien leurs performances à l'état frais par l'amélioration de la fluidité et l'élimination des risques de ségrégation et de ressuage en relation avec le dosage, que leurs propriétés à l'état durci par l'augmentation des résistances mécaniques [6-9]. Parmi ces additifs on distingue :

- **Des ajouts artificiels** (cendres volantes, fumée de silice, laitier de haut fourneau).
- **Les ajouts naturels** (pouzzolane naturelle, additions siliceuses (sable), calcaire).

NEHDI et al. [10] ont confirmé que l'introduction des ajouts minéraux en grande quantité améliore la durabilité des BAP. Pour des mélanges binaires et ternaires, les ajouts améliorent l'ouvrabilité, donnent de grandes résistances à long terme, faible expansion du sulfate et une très faible perméabilité aux ions chlorures.

Les bétons autoplaçants contenant des fines de calcaire présentent de bonnes propriétés à l'état frais et une excellente qualité de parement [11]. Ceci est attribué à leur grande finesse qui complète la distribution granulométrique du mélange [12].

L'utilisation de fumées de silice augmente la demande en eau et en superplastifiant pour garder les propriétés rhéologiques du béton ainsi que la viscosité plastique du mélange [13].

La substitution d'une partie de ciment par des laitiers de hauts fourneaux a été jugée très bénéfique sur le comportement des BAP à l'état frais [14]. Pour un rapport E/C et un dosage en superplastifiants constants, une amélioration de la maniabilité a été observée. Cette amélioration est attribuée à la qualité de surface de ses grains qui crée des zones de glissement dans la pâte [15]. Par ailleurs, les auteurs ont remarqué que la demande en eau diminue avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange [14]. Cependant, une diminution de la résistance à la compression a été observée lorsqu'une partie du ciment est substituée par les laitiers.

Les cendres volantes améliorent l'ouvrabilité et l'écoulement du béton à travers les sections encombrées en agissant par leur finesse, leur forme et leur état de surface [6 -16].

#### 1.4.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont des additions qui sont incorporées durant le malaxage du béton, et ceci dans le but de modifier ou d'améliorer certaines de ses propriétés (fluidité, propriétés rhéologiques). Les adjuvants les plus utilisés dans les BAP sont les superplastifiants et les agents de viscosité. 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. 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 [17]. 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.

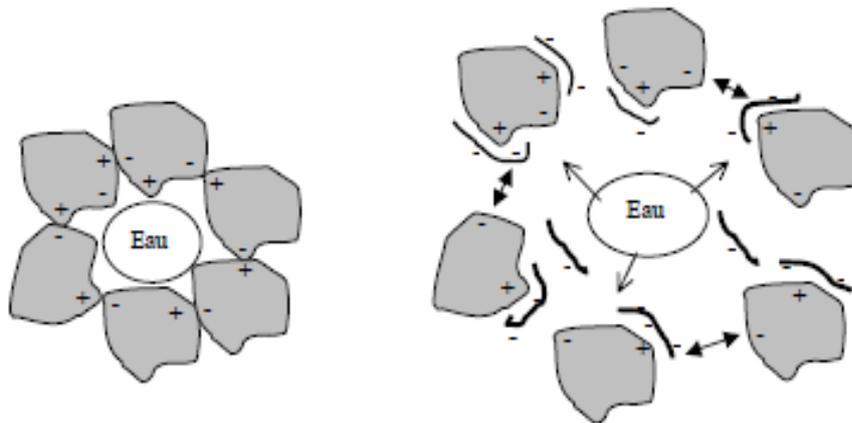


Figure 1.3: A : Etat initial (Avant l'action du superplastifiant)  
B : Défloculation des grains de ciment [9].

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 1.4). 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.

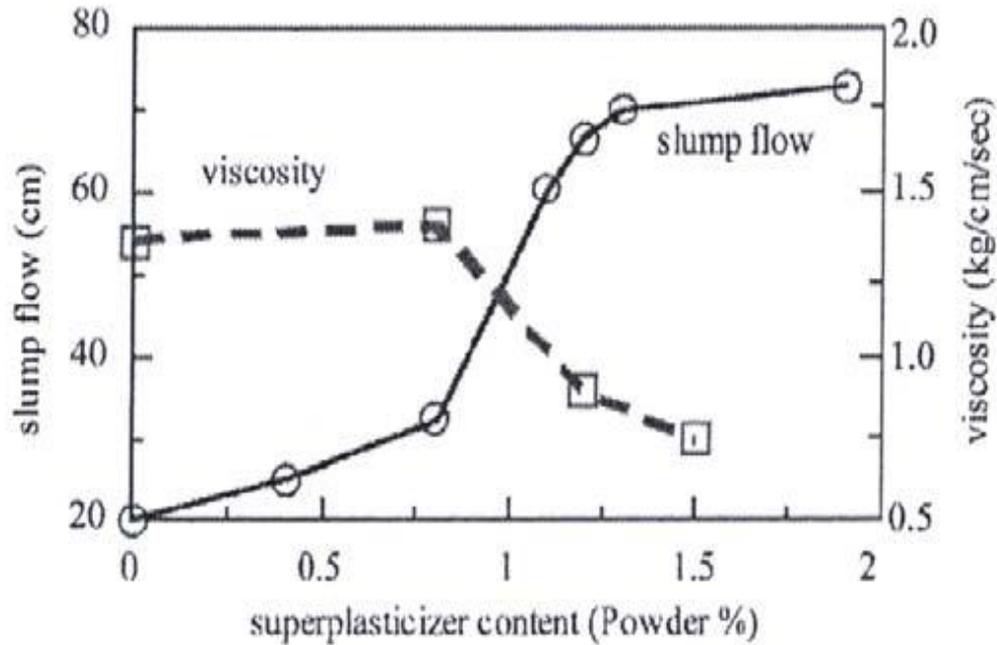


Figure 1.4: Effet des superplastifiants sur l'étalement et la viscosité des pâtes cimentaires [9].

Les BAP contiennent souvent un agent de viscosité afin de minimiser leur sensibilité à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Ce sont généralement des dérivés celluloseux, 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.

## 1.5. Formulation des bétons autoplaçants

### 1.5.1. Principe de formulation

Les BAP doivent présenter une grande fluidité et pouvoir s'écouler avec un débit suffisant sans apport d'énergie externe à travers des zones confinées. Ils doivent s'opposer à la ségrégation « dynamique » (en phase de coulage) et à la ségrégation « statique » (une fois en place) afin de garantir l'homogénéité des caractéristiques et de ne pas présenter de ressuage ou de tassement. Pour ce faire, la formulation des BAP repose sur trois paramètres :

- Fluidification de la pâte : elle est obtenue par l'utilisation d'un superplastifiant,
- Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement : la taille des granulats qui peuvent être concassés ou roulés est faible ; le volume de pâte et la quantité de fines sont plus importants que pour un béton mis en œuvre par vibration,
- Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation: elle est obtenue par l'emploi d'agents de viscosité et l'incorporation d'additions (fillers, cendres volantes, laitier de hauts fourneaux, pouzzolane, fumées de silice).

### 1.5.2. Méthodes de formulation

Plusieurs méthodes de formulation des BAP sont présentées dans la littérature :

#### 1.5.2.1. Méthode Japonaise

La méthode japonaise développée par OKAMURA et OZAWA est l'une des premières méthodes mises au point pour la formulation des bétons autoplacants [8]. La méthode préconise l'augmentation du volume de la pâte au détriment du volume des granulats. Le volume des gravillons est limité au maximum à 50% au volume solide du béton et ceci dans le but d'éviter tout risque de blocage. Afin d'assurer une bonne ouvrabilité, le volume du sable de diamètre supérieur à 90  $\mu\text{m}$  est égal à 40% du volume total du mortier.

Les mortiers sont caractérisés par un essai d'étalement au cône et un essai d'écoulement à l'entonnoir (Figure 1.5). Les essais réalisés ont conduit les chercheurs à définir deux grandeurs :

- L'étalement relatif (fluidité) :  $\Gamma_m = (d^2 - d_0^2) / d_0^2$ ,
- La vitesse relative d'écoulement :  $R_m = 10/t$ .

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.

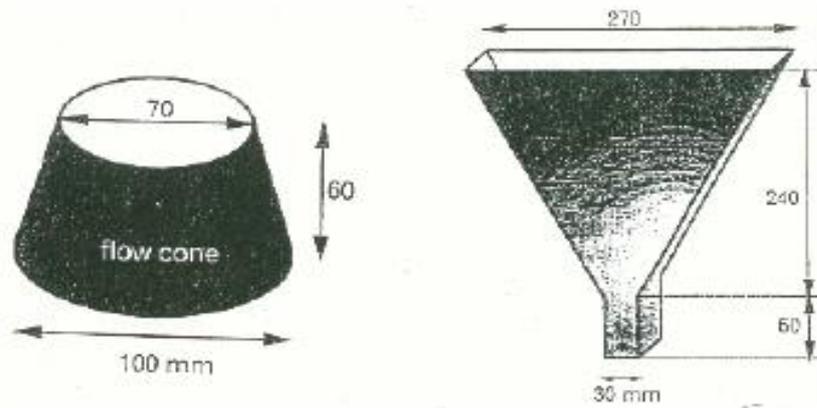


Figure 1.5 : Cône et entonnoir pour mesurer l'étalement et le temps d'écoulement des mortiers [18].

Plus la valeur de  $\Gamma_m$  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.

#### 1.5.2.2. Méthode Française (LCPC)

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).

### 1.5.2.3. Méthode Suédoise (CBI)

La méthode de formulation suédoise est basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferraillés. 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. Les auteurs [19-20] ont montré que pour une taille de granulat donnée, il existe une teneur critique en dessus de laquelle le blocage est absolu. 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). Cette méthode suppose que le phénomène de blocage est indépendant de la nature de la pâte, pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide.

La méthode CBI consiste à déterminer le risque de blocage  $R_b$  par la relation :

$$R_b = \sum V_i / V_{crit, i} \dots\dots\dots (1.1)$$

Où  $V_i$  : la proportion volumique des granulats de taille  $d_i$ ,

$V_{crit, i}$  : 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.

### 1.5.2.4. Méthode JSCE

Cette méthode a été présentée par la Japanese Society of Civil Engineers (JSCE). Dans cette formulation, la quantité d'eau, le rapport eau/poudres et la teneur en poudre varient en fonction de l'utilisation ou non d'un agent de cohésion. Les points principaux de cette formulation sont :

- Le diamètre maximal des granulats est limité à 20 mm. Le volume des gros granulats varie de 0,30 à 0,32 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de béton ; Il peut être plus important pour une faible fluidité.
- En présence d'un agent de viscosité, la quantité d'eau est inférieure à 180 kg/m<sup>3</sup> dans les conditions d'exposition normales. Si la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, cette valeur peut aller jusqu'à 190 kg/m<sup>3</sup>. En l'absence d'un agent de viscosité, la quantité d'eau doit être comprise entre 155 et 175 kg/m<sup>3</sup> ;

- Le rapport E/P dépend des propriétés du béton dans le cas d'utilisation d'un agent de viscosité, dans le cas contraire, il doit être compris entre 28 et 37 % en masse ;
- La quantité d'air est en fonction de la dimension maximale du granulat, la résistance demandée et des conditions environnementales. La valeur type est de 4,5% d'air ;
- La quantité de sable est obtenue par déduction des quantités de gravier, eau, poudre ;
- Le dosage de superplastifiant est déterminé à partir des expériences précédentes et fiches techniques des fabricants ; La teneur en agent de viscosité est variée selon le type d'agent.

#### 1.6. Propriétés des BAP à l'état frais

Les bétons autoplaçants sont caractérisés par une grande fluidité qui permet d'envisager le bétonnage de zones fortement ferraiées, difficilement accessibles ou de géométrie complexe. Cependant, les BAP ne doivent pas présenter de problèmes de stabilité ou de blocage lors de l'écoulement. Les principales propriétés recherchées des BAP frais sont :

- **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, utilisation d'un liant présentant une granularité continue).
- **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.
- **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).

## 1.7. Propriétés mécaniques des BAP

Les spécificités de formulation des bétons 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.

### 1.7.1. 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. Le rapport E/C est l'un des facteurs les plus influents sur la résistance en compression. L'influence du rapport E/C est comparable à celle obtenue sur les bétons conventionnels [21]. En effet, un développement rapide de la résistance mécanique peut être obtenu en réduisant la quantité de l'eau libre dans le béton (Figure 1.6).

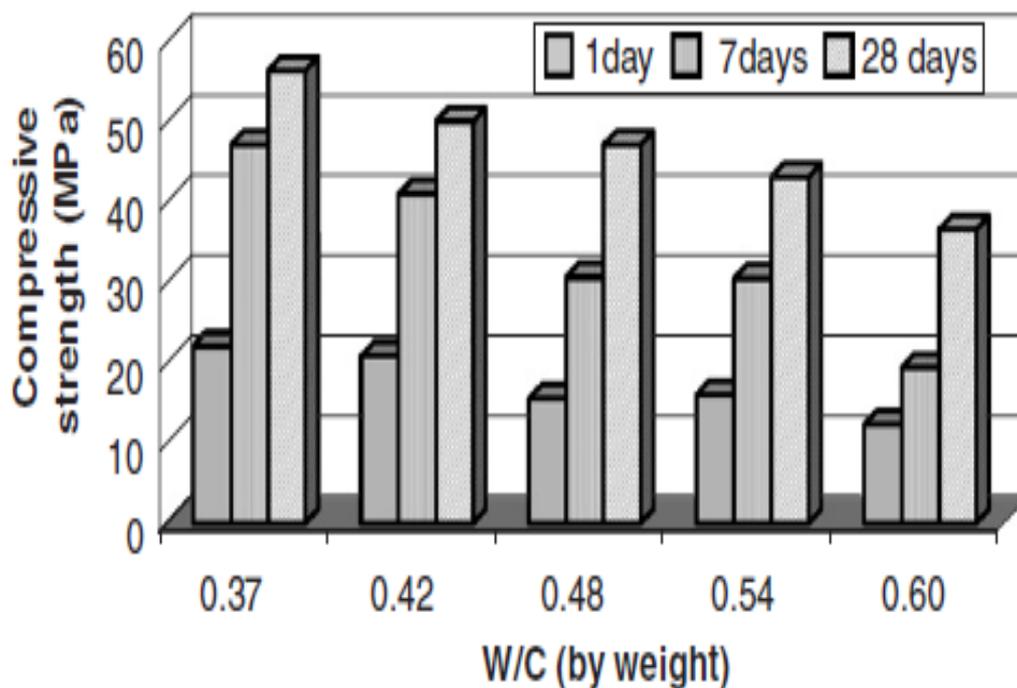


Figure 1.6 : Évolution de la résistance en compression des BAP en fonction de E/C [21].

Par ailleurs, la résistance en compression est influencée par le volume de la pâte. En effet, une diminution de 12% de la résistance pour une augmentation de 57% du volume de pâte a été observée [22]. KOLIAS et GEORGIU [23], ont également montré que pour un même rapport E/C, l'accroissement du volume de la pâte conduit à une diminution de la résistance mécanique. L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges (Figure 1.7). L'augmentation de la résistance est due à l'amélioration de l'hydratation et à la densification de la structure de la matrice cimentaire [24-25].

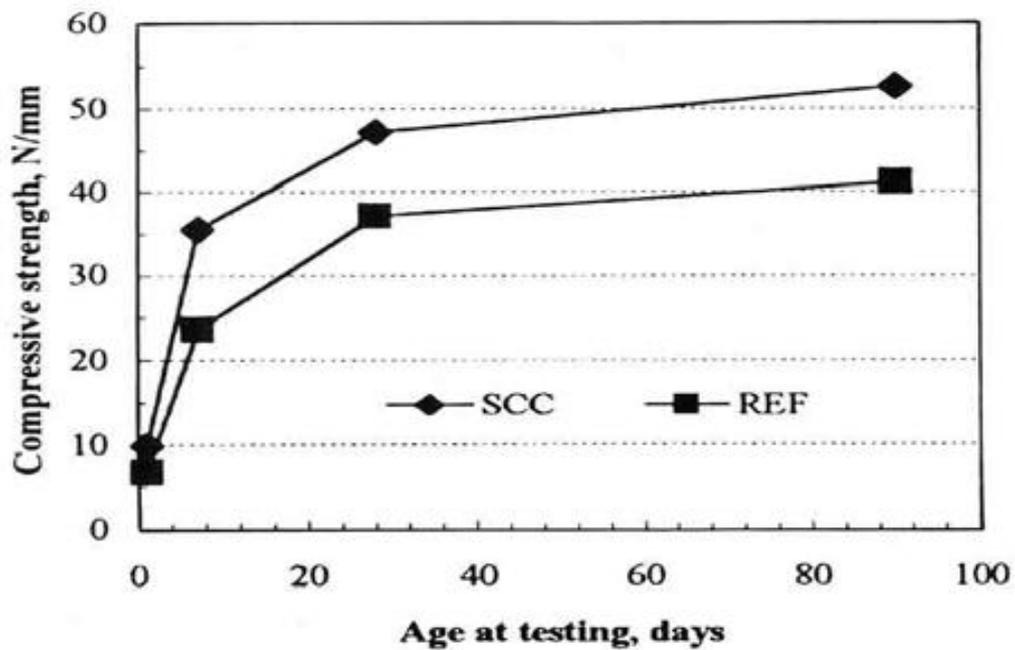


Figure 1.7 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) [23].

FELEKOGU et al. [26], ont montré que les bétons autoplacants incorporant des cendres volantes présentent un faible développement de la résistance à jeune âge. Cependant une bonne résistance à la compression à 28 jours a été observée. SIDDIQUE [27], a également montré que la résistance à la compression des BAP augmente avec la diminution du pourcentage des cendres volantes (Figure 1.8).

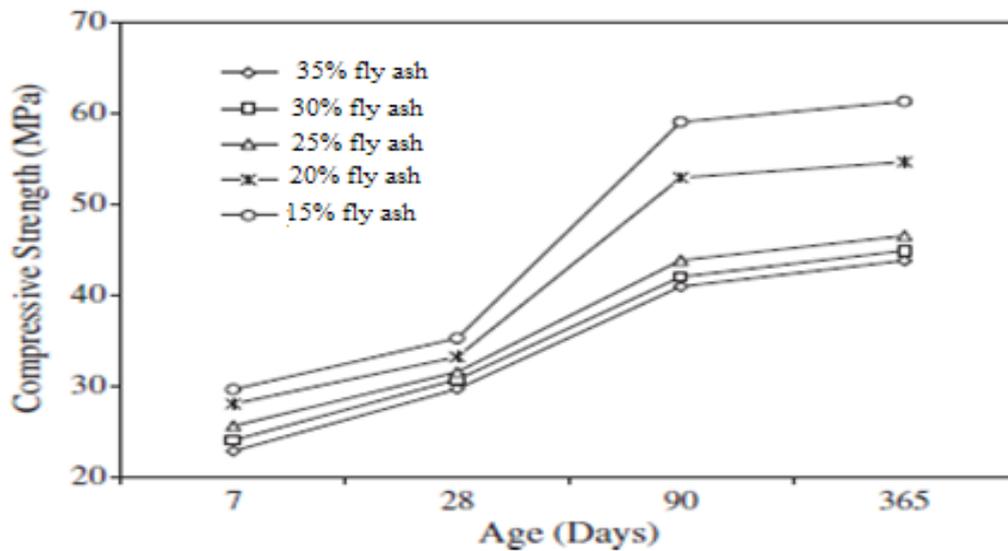


Figure 1.8: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP [27].

L'influence des cendres volantes sur la résistance est plus significative à des teneurs très élevées. En effet, une baisse de résistance de 75 % a été observée pour une augmentation de 20 à 80 % de la quantité des cendres volantes [28]. CHABI et al. [29] 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 1.9). Ceci a été expliqué par la propriété latente de l'hydratation des ciments avec la pouzzolane et le laitier.

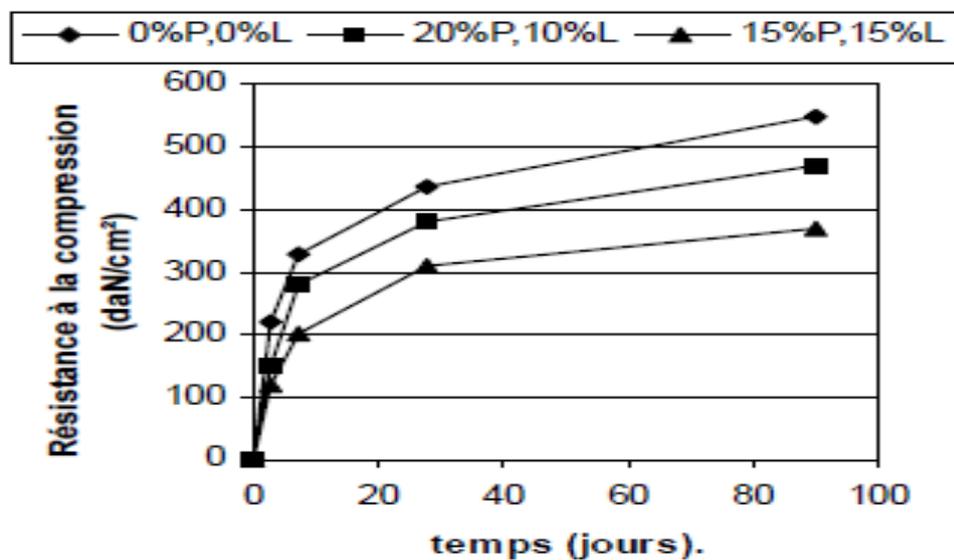


Figure 1.9: Résistance à la compression en fonction de la teneur de pouzzolane et de laitier [29].

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations des bétons autoplaçants peut également avoir une incidence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. L'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer considérablement la résistance mécanique d'un BAP à jeune âge. Par ailleurs, l'utilisation de certains superplastifiants a pour conséquence d'augmenter le développement de la résistance mécanique [22-27].

### 1.7.2. Résistance à la traction

La composition spécifique des BAP peut entraîner des variations de résistance. En effet, l'accroissement de la quantité de sable et/ou du volume des fines engendre une élévation de la résistance en traction [22]. PERRA et al. [30] ont observé que la résistance à la traction des BAP incorporant des fillers calcaires est inférieure (15 % en moyenne) à celle mesurée sur un béton ordinaire. Pour certains auteurs, la porosité de l'aurole de transition des BAP est inférieure à celle des BV. Donc, la résistance en traction des BAP est supérieure à celle des BV (de l'ordre de 10%) [22]. Par ailleurs, SIDDIQUE [27] a montré que la résistance à la traction est d'autant plus élevée que le pourcentage des cendres volantes dans un BAP est faible (Figure 1.10).

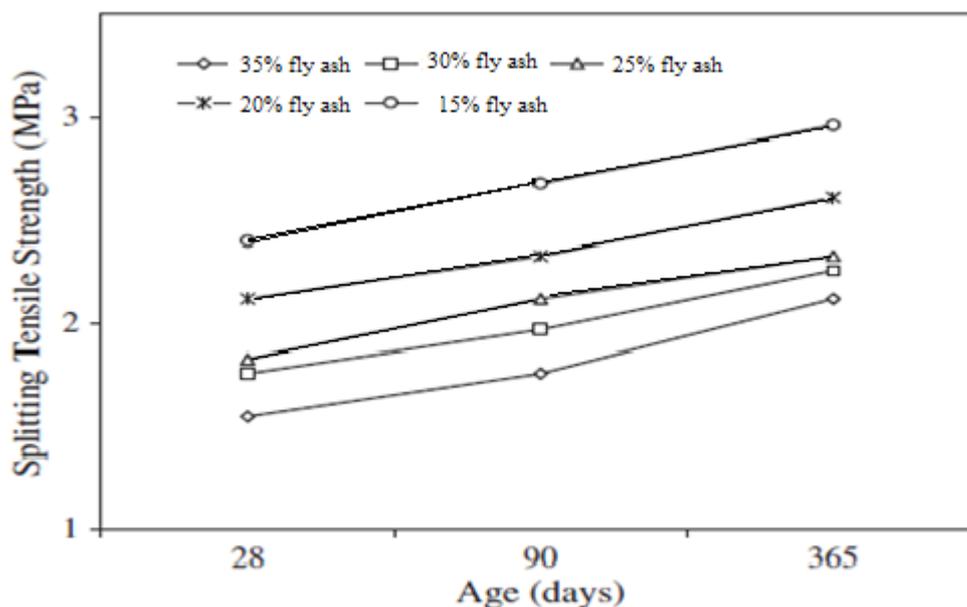


Figure 1.10 : Développement de la résistance à la traction des BAP à différents âges [27].

### 1.7.3. Module d'élasticité

Le module de Young du béton autoplaçant est généralement comparable à celui d'un béton vibré pour la même valeur de résistance (Figure 1.11 et 1.12). Cependant, DOMONE [31] a montré que pour une faible résistance en compression (20 MPa), le module d'élasticité des bétons autoplaçants peut être jusqu'à 40 % inférieure à celui des bétons vibrés. Et pour des résistances élevées (90-100 MPa), la différence se réduit à moins de 5 %.

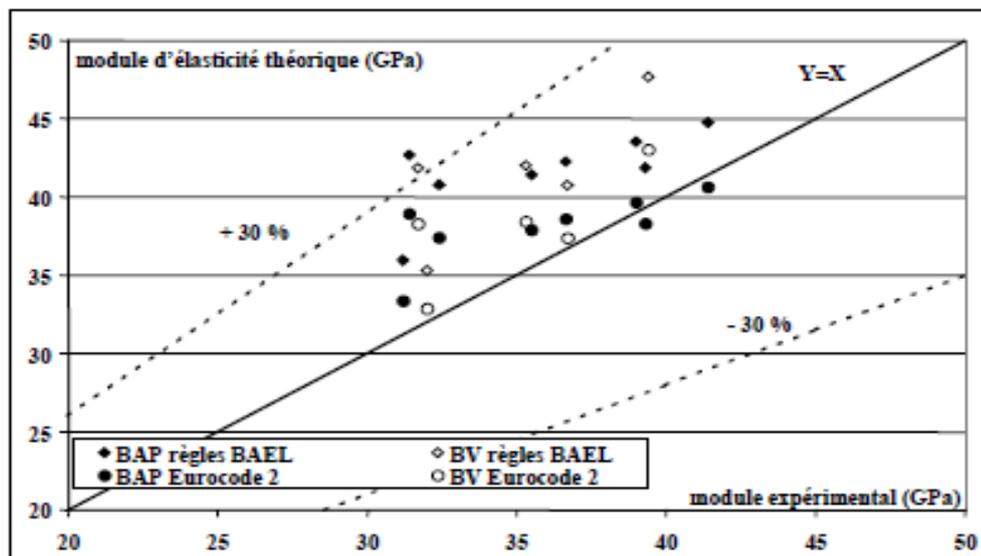


Figure 1.11 : Comparaison des modules élastiques théoriques des BAP et des BV avec leurs valeurs expérimentales [32].

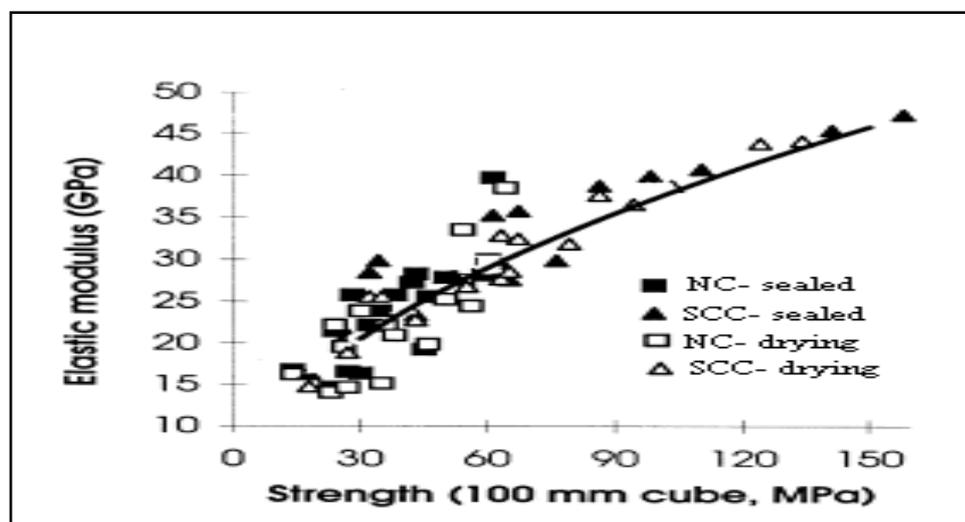


Figure 1.12 : Modules élastiques des BAP et des BV [33].

Les bétons autoplaçants se caractérisent par un faible volume de gros granulats et un contenu de pâte plus élevé, ceci explique le faible module d'élasticité des BAP. HOLSCHEMACHER et KLUG [34] ont montré aussi que le module d'élasticité des bétons autoplaçants pourrait être de 20 % inférieure à celui des bétons courants produits avec les mêmes agrégats.

## 1.8. Durabilité des BAP

Une structure en béton doit conserver sa résistance et continuer à remplir sa fonction structurelle tout au long de sa durée de vie utile et spécifiée. La durabilité du béton s'explique en grande partie par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons. Elle est conditionnée par les phénomènes de transport qui sont les forces motrices entraînant la pénétration des agents agressifs extérieurs à l'intérieur du matériau par perméation, absorption ou diffusion.

### 1.8.1. Perméabilité aux gaz

La perméabilité d'un matériau se définit comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide (eau ou gaz) sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité du béton est un paramètre fondamental contrôlant la durabilité des structures. C'est surtout la perméabilité de la peau du matériau qui est la plus étroitement liée à la durabilité. En effet, c'est véritablement cette peau qui bloque ou ralentit le passage des agents agressifs qui peuvent nuire à la qualité de la masse du béton ou corroder les aciers d'armature. La perméabilité est influencée par plusieurs facteurs entrant en jeu lors de l'écoulement du gaz à travers un milieu poreux. Elle dépend des caractéristiques propres du matériau, notamment de sa microstructure.

Le rapport eau/ciment exerce une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydraté. En effet, La réduction du rapport E/C permet non seulement de diminuer le volume total des pores capillaires mais elle permet aussi de réduire leur diamètre. Pour un E/C plus faible, la porosité capillaire est en fait constituée d'un réseau de pores plus fin et plus discontinu. La perméabilité de la pâte s'en trouve alors considérablement diminuée car il y a très peu de chemins préférentiels pour le passage des liquides et des gaz agressifs.

TRAGARDH et ASSIE [35-36] ont observé que pour le même rapport E/C, l'utilisation des additions minérales telles que les fillers calcaires procurent aux BAP une microstructure plus dense comparée à celle des bétons courants. Par ailleurs, les auteurs ont remarqué que la porosité des BAP, en particulier celle de l'auréole de transition, est significativement plus faible que celle des bétons vibrés. Il en résulte alors une amélioration des propriétés de transfert, comme la perméabilité aux gaz et une meilleure durabilité des ces bétons (Figure 1.13). La perméabilité de l'oxygène des bétons autoplaçants est aussi inférieure à celle des bétons vibrés car l'utilisation des additions minérales joue un rôle important dans la réduction de la perméabilité [37].

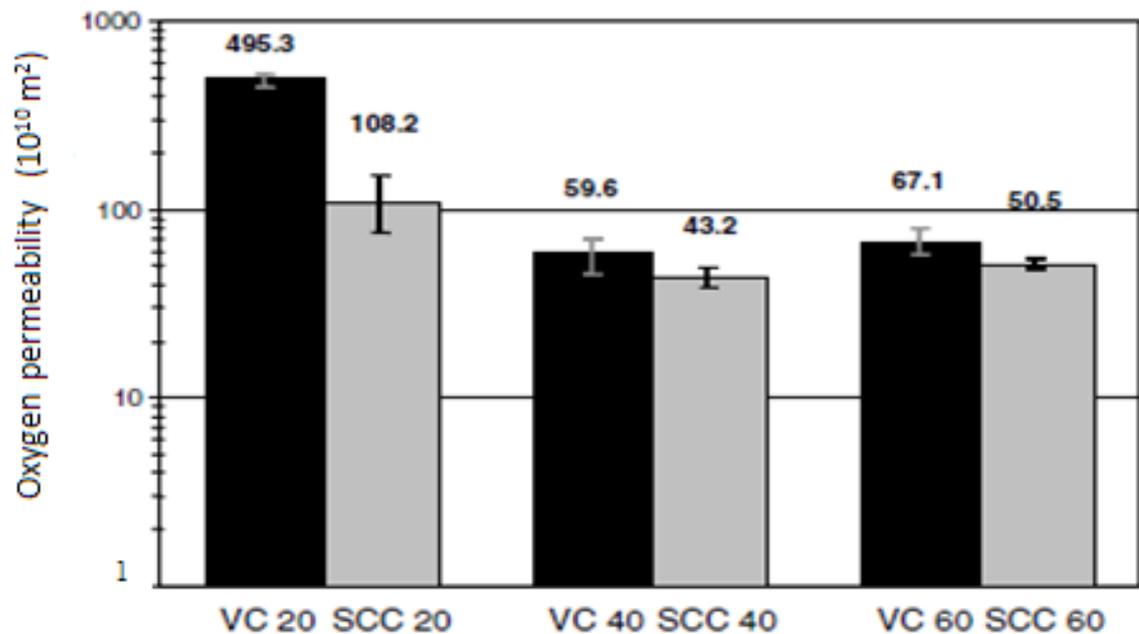


Figure 1.13 : Perméabilité à l'oxygène des bétons [36].

### 1.8.2. Absorption capillaire

L'absorption capillaire est l'un des mécanismes de transfert des liquides dans les matériaux poreux. Ce phénomène résulte des tensions de surface dans les capillaires. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec dépend de la structure poreuse du matériau et de la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité) qui dépend elle-même du taux d'humidité du béton. Plus ce dernier est élevé, plus la valeur d'absorptivité est faible.

Les spécificités de composition des BAP (volume de pâte élevé, additions minérales) pourraient les conduire à obtenir une valeur d'absorption d'eau différente de celle des bétons courants. ZHU et BARTOS [37] ont montré que pour la même classe de résistance, l'absorption capillaire des bétons autoplaçants est significativement plus faible que celle des bétons vibrés. L'ajout des cendres volantes et fillers calcaires dans la composition des BAP conduit à une amélioration de leur performance (absorption capillaire) [32-38]. Il a été également démontré que l'addition de la fumée de silice dans la formulation des BAP conduit à une absorption similaire à celle des BV (Figure 1.14). Ce comportement a été expliqué par une incompatibilité entre la fumée de silice et les superplastifiants.

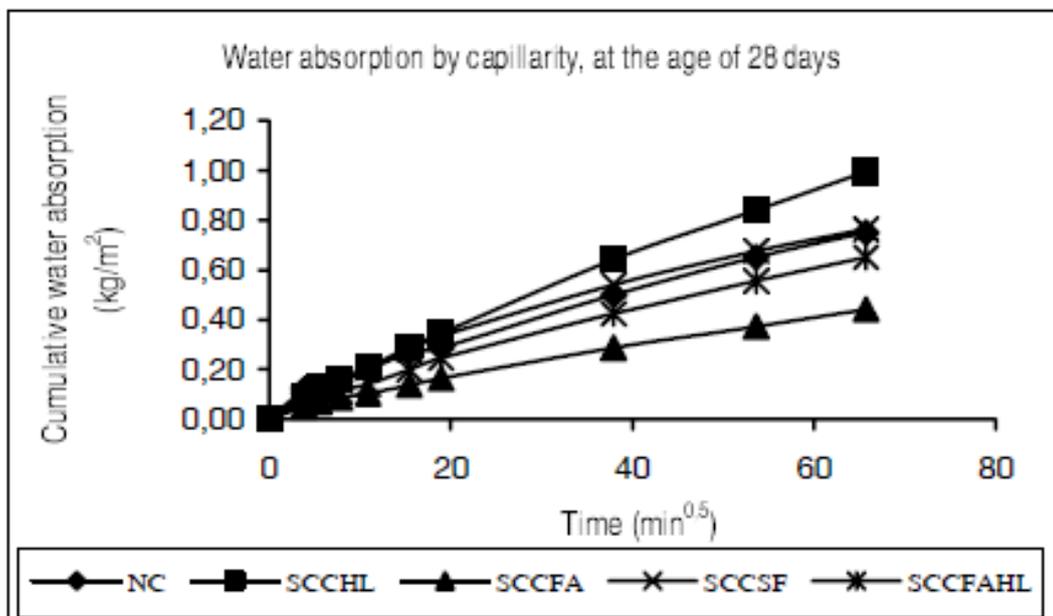


Figure 1.14 : Absorption capillaire des BAP et d'un BV [38].

### 1.8.3. Diffusion des ions chlorures

La diffusion est un mécanisme de transfert qui résulte de la migration de la matière, à travers le béton, due à un gradient de concentration. La solution interstitielle contenue dans les pores du béton véhicule des ions, dont certains sont de nature agressive comme les chlorures. Les ions chlorures pénètrent dans le béton, s'accumulent pendant un certain temps au niveau des premières armatures jusqu'à une certaine concentration à partir

de laquelle ils détruisent localement le film de passivation (diminution du pH), ce qui initie une corrosion localisée (corrosion par piqure) puis généralisée à toute la surface de l'acier. Le temps de déclenchement dépend de plusieurs paramètres tels que l'épaisseur de l'enrobage, la concentration extérieure en chlorures, la qualité du béton d'enrobage. La corrosion s'amorce dès que la teneur en chlorures est de l'ordre de 0,4 à 0,5 % par rapport à la masse de ciment contenue dans le béton [39]. ASSIE et al. [36] a montré que les bétons autoplçants formulés avec des fillers calcaires sont caractérisés par un comportement équivalent à celui des bétons conventionnels vis-à-vis de la pénétration des ions chlores pour différentes classes de résistance (Figure 1.15).

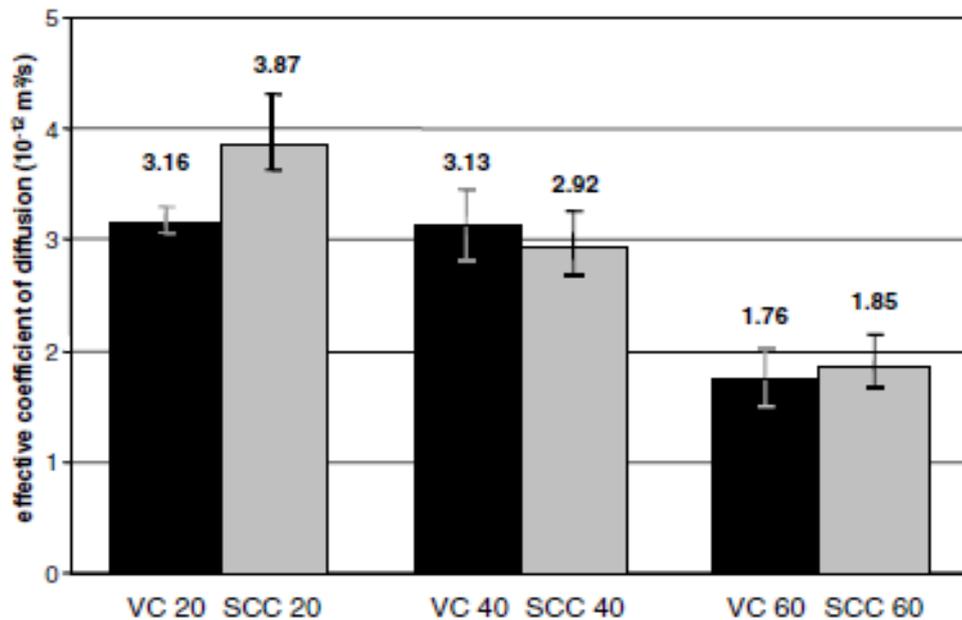
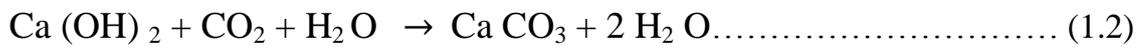


Figure 1.15 : Coefficient de diffusion des ions chlores [36].

ZHU et BARTOS [37] ont observé que la diffusion des ions chlores est considérablement affectée par le type d'ajout utilisé dans la formulation du béton. En effet, il a été montré que les bétons autoplçants contenant des cendres volantes sont caractérisés par un faible coefficient de migration des ions chlores. Par ailleurs, YAZICI [40] a observé expérimentalement que l'incorporation des cendres volantes et/ou de la fumée de silice améliore la résistance à la pénétration des chlorures.

#### 1.8.4. Carbonatation

La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air est un phénomène naturel. Une fois dans le béton, le  $\text{CO}_2$  réagit avec les produits hydratés, en particulier les hydroxydes de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , selon une réaction produisant du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  :



Cette réaction entraîne une diminution importante de la valeur du pH du béton (initialement de 12 à 13) par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 8 [39], et ainsi la destruction de la couche de passivation protégeant les armatures. La corrosion des armatures entraîne leur gonflement ce qui provoque la fissuration du béton et l'éclatement du béton d'enrobage (Figure 1.16).

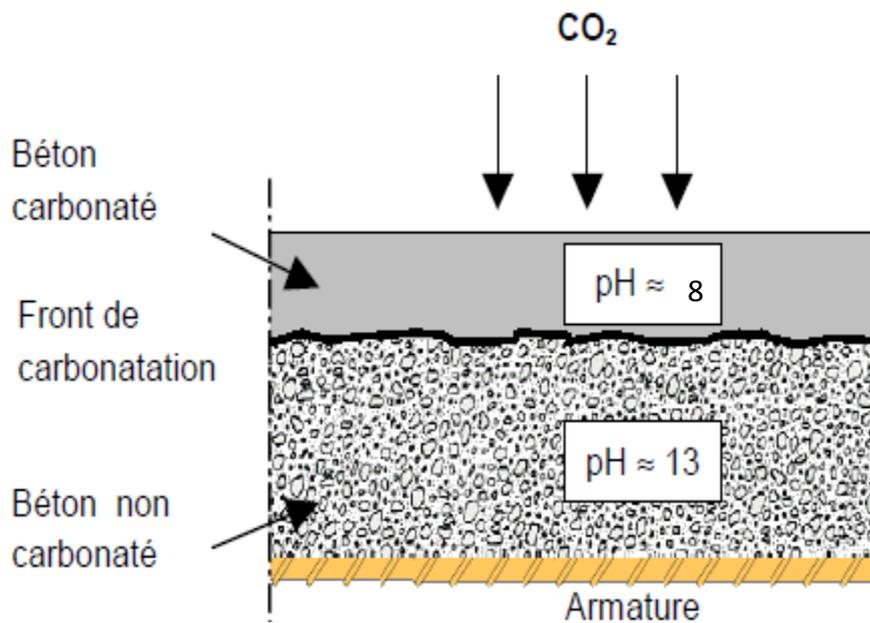


Figure 1.16 : Progression de la carbonatation

L'avancement du front de carbonatation est en fonction de plusieurs paramètres liés aux caractéristiques du béton (nature et dosage du ciment, dosage en eau, porosité et perméabilité) et au milieu environnant. En effet, plus le béton est compact, le dosage en ciment est élevé, le rapport eau/ciment est faible et la résistance du béton est élevée, plus la progression de la carbonatation est lente. Par ailleurs, L'humidité relative de l'air joue, en particulier, un rôle important : la vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité relative de l'ordre de 60 %, pratiquement nulle en atmosphère sec ou pour des bétons complètement saturés en eau [39]. Elle dépend aussi de la concentration en dioxyde de carbone et de la température de l'atmosphère environnant. Le taux de carbonatation est plus faible dans les bétons autoplaçants comparé aux bétons conventionnels (Figure 1.17). Ceci a été expliqué par le fait que les fillers calcaires (contenus dans les compositions des BAP) permettent d'obtenir moins de porosité et une microstructure plus fine.

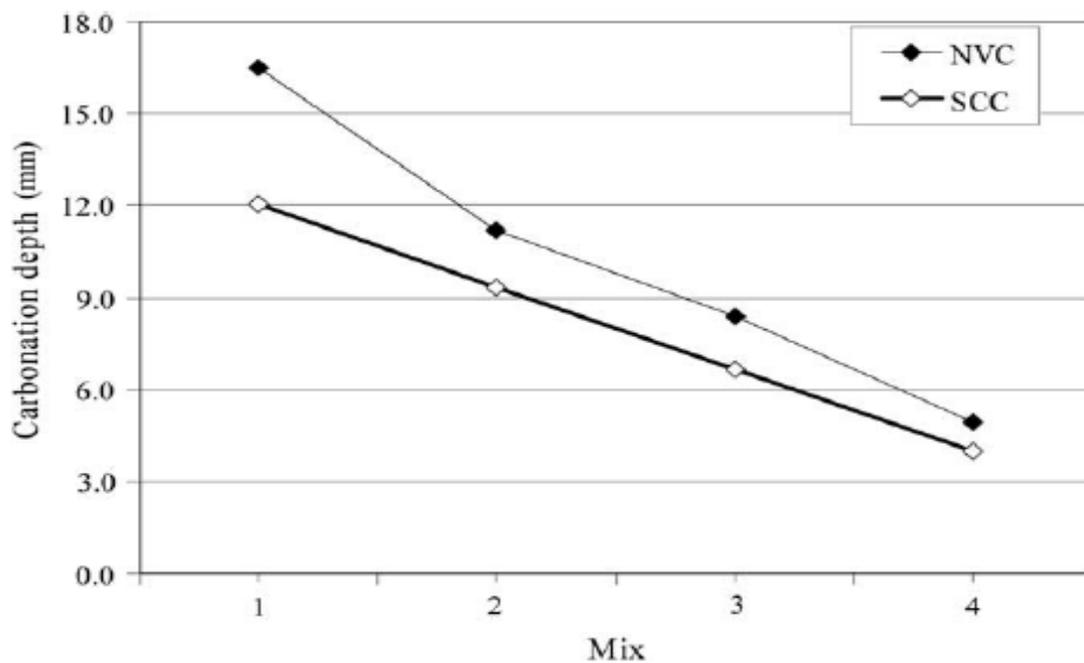


Figure 1.17 : Profondeur de carbonatation à l'âge de 42 mois [41].

Cependant, d'autres chercheurs ont constaté qu'il n'y a pas de différence notable entre les cinétiques de carbonatation des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires (Figure 1.18).

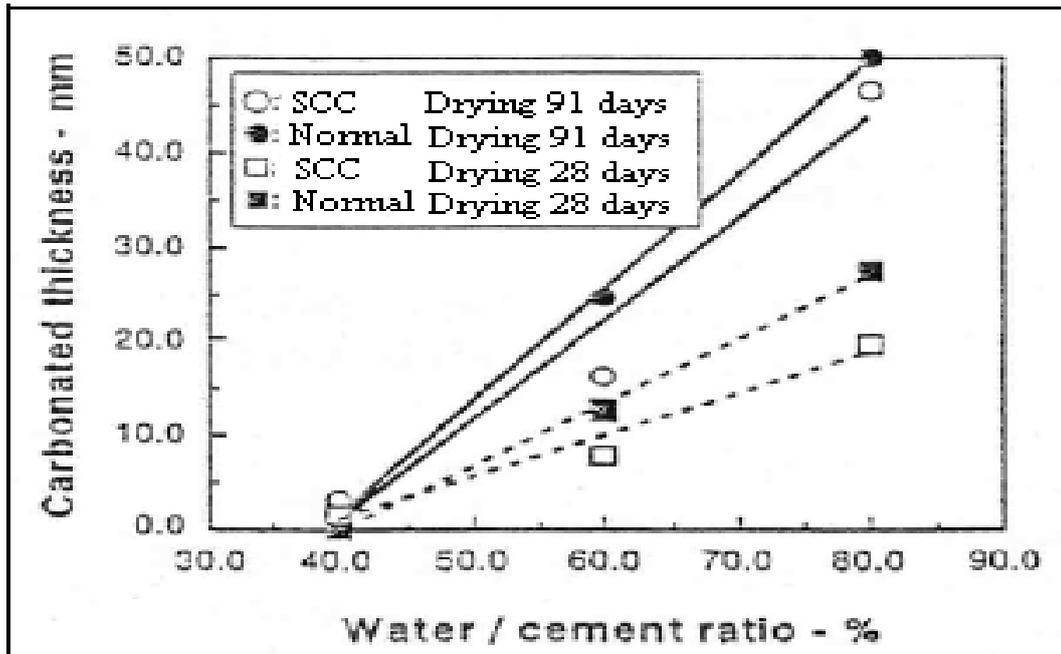


Figure 1.18 : Profondeur de carbonatation des BAP et des BV [32].

### 1.9. Conclusion

Le béton autoplaçant est un matériau caractérisé par un grand volume de pâte, riche en fines associé à une faible teneur en granulats. La fluidité est améliorée par l'utilisation des superplastifiants et éventuellement d'un agent de viscosité. Leur formulation est très complexe demandant une attention particulière et nécessite d'établir un bon compromis entre les principales propriétés des BAP (la fluidité et la stabilité). A l'état durci, les propriétés mécaniques et physico-chimiques sont fortement influencées par la composition. La microstructure des bétons autoplaçants diffère de celle des bétons ordinaires. L'emploi des ajouts minéraux améliore considérablement la distribution de la taille des pores emmenant à une densification de la microstructure.

## **Chapitre 2**

# **RETRAIT DES BETONS AUTOPLACANTS**

## CHAPITRE 2 RETRAIT DES BETONS AUTOPLACANTS

### 2.1. Généralités

Dans ce chapitre, on présente une revue bibliographique sommaire sur le mécanisme du retrait, les différents types de retrait ainsi que les facteurs influençant le retrait des bétons autoplaçants.

### 2.2. Etat de l'eau dans la pâte de ciment hydraté

A l'intérieur de la pâte de ciment hydraté, l'eau se trouve sous différentes formes. Cette eau est généralement classée selon la nature de sa liaison avec la pâte de ciment (Figure 2.1). Ainsi, on distingue :

- ***L'eau combinée chimiquement*** : C'est l'eau consommée au cours des réactions d'hydratation. Elle est partie intégrante des C-S-H. C'est une eau très stable qui ne peut pas être évaporée sauf si le C-S-H est décomposé à haute température [42].
- ***L'eau zéolitique (interlayer)*** : Cette eau est retenue entre les feuillets de C-S-H par des liens hydrogènes sans qu'elle soit combinée chimiquement. Son évaporation commence à des taux d'humidité inférieur à 30 % [42].
- ***L'eau adsorbée*** : Cette eau est physiquement liée sur la surface des solides. Elle forme des couches d'une à six molécules liées par des ponts hydrogènes. Les forces d'attractions assurant la liaison sont de faible intensité. Ainsi, une grande partie de cette eau peut être retirée à un taux d'humidité inférieur à 50 % [42].
- ***L'eau des capillaires ( eau libre et eau non libre)*** : Il s'agit de l'excès d'eau qui n'a pas participé à la réaction d'hydratation. Selon la taille des capillaires, cette eau peut être plus ou moins libre en raison de l'importance des forces de surface. L'eau libre est principalement contenue dans les plus gros capillaires (de dimension supérieur à 0,05  $\mu\text{m}$ ). Son départ n'induit pas un retrait important de la pâte de ciment. L'eau non libre est retenue par des tensions capillaires dans les pores de dimension inférieur à 0,05  $\mu\text{m}$ .

Son départ, activé pour des taux d'humidité inférieure à 90 %, influence d'une manière importante le retrait de la pâte de ciment [42].

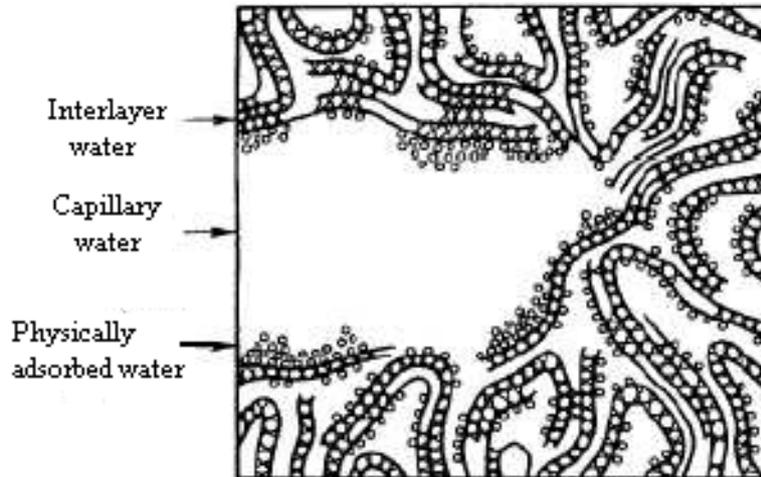


Figure 2.1 : Etat de l'eau dans la pâte de ciment [42].

### 2.3. Retrait et fissuration des BAP

Le retrait du béton est défini comme une déformation volumique du matériau au cours de son durcissement, induite par des phénomènes physicochimiques 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 au changement 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. Plusieurs types de retrait affectent le retrait total :

### 2.4. Retrait plastique

Le retrait plastique, appelé aussi retrait avant prise ou retrait capillaire, 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, de l'humidité relative et de la vitesse du vent. Les fissures apparaissent dans le béton lorsque le retrait empêché dépasse sa capacité de déformation (Figure 2.2). 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.

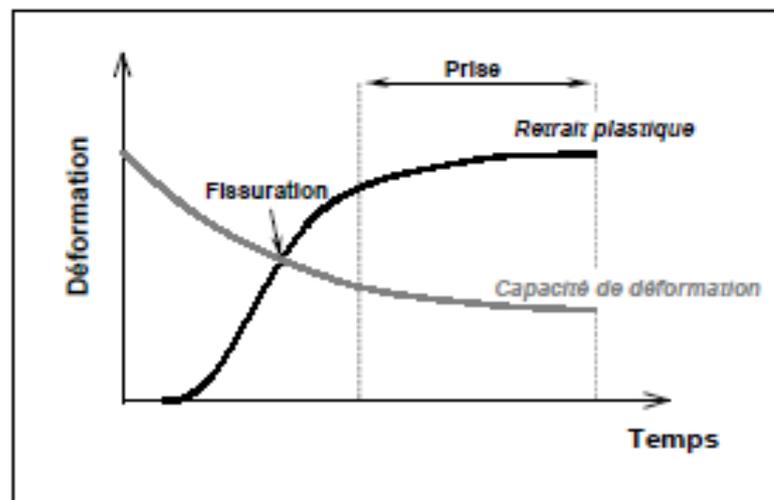


Figure 2.2: Fissuration à l'état frais, en termes de retrait et capacité de déformation [4].

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, schématisée par le trait en pointillés (Figure 2.3). Ce phénomène de tassement et de sédimentation du squelette du béton peut être à l'origine de fissures. 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 [43]. 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 [44- 45].

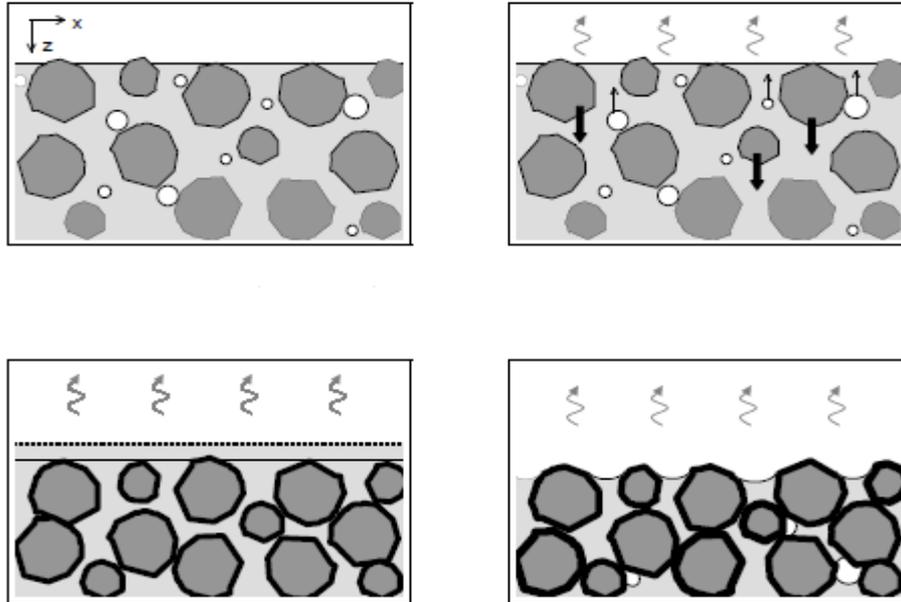


Figure 2.3: Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment [4].

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 [46]. 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 (Figure 2.4).

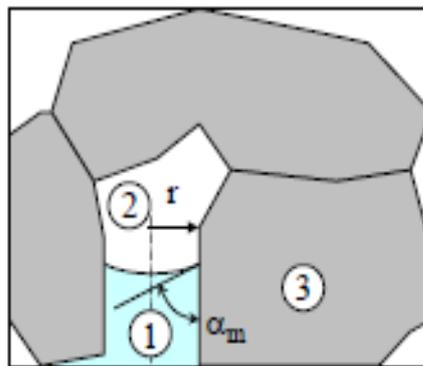


Figure 2.4: Schéma d'un ménisque capillaire non saturé (1-phase liquide, 2- phase gazeuse, 3 phase solide).

Ce mécanisme, principale cause du retrait plastique du matériau cimentaire est généralement décrit par les lois de Kelvin et de Laplace.

- Loi de Kelvin

$$\Delta P = RT/Mv. \ln h \dots\dots\dots(2.1)$$

DP : gradient de pression entre la phase gazeuse et la phase liquide,

R : constante des gaz parfaits,

T : température de l'eau capillaire,

M : masse d'une mole d'eau,

v : volume massique de l'eau,

h : humidité relative dans le pore capillaire.

- Loi de Laplace

$$\Delta P = 2\sigma/r. \cos \theta \dots\dots\dots (2.2)$$

DP : gradient de pression entre la phase gazeuse et la phase liquide,

$\sigma$  : tension superficielle de l'eau,

r : rayon d'un pore capillaire où existe le ménisque,

$\theta$ : angle de mouillage.

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

$$\Delta P = RT/Mv. \ln h = 2\sigma/r \cos \theta \dots\dots\dots (2.3)$$

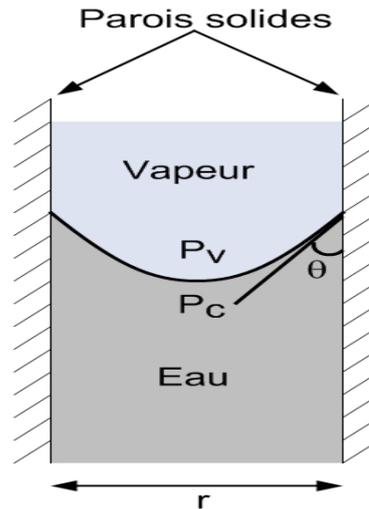


Figure 2.5 : Schématisation d'un ménisque au cours du séchage [42].

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 ont montré que l'amplitude maximale du retrait plastique des bétons autoplaçants est au moins cinq fois supérieure à celle des bétons conventionnels (Figure 2.6).

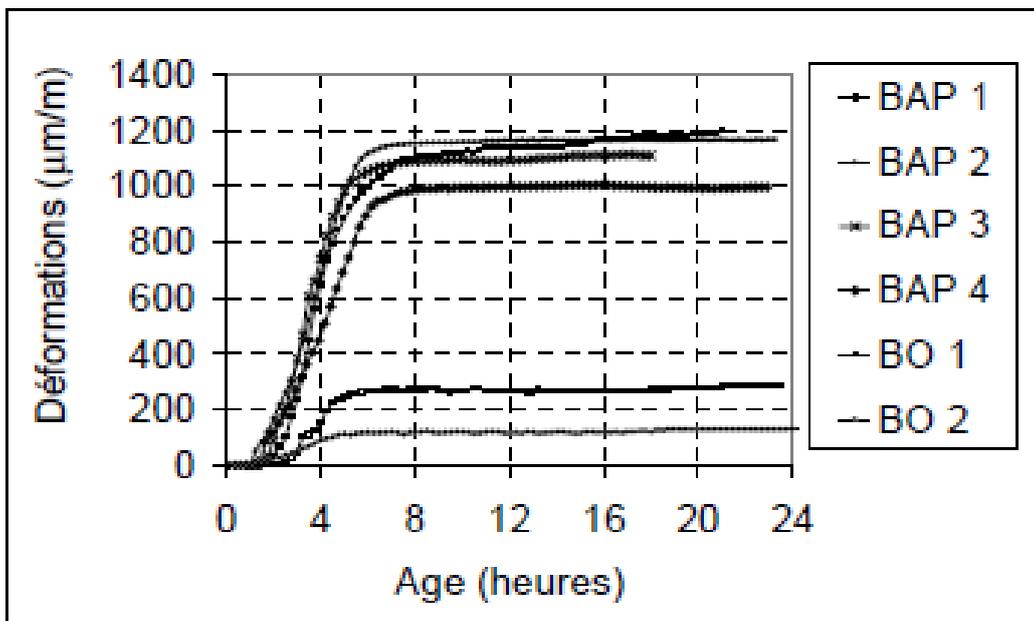


Figure 2.6 : Retrait plastique des formules de BAP et de BO dérivés [46].

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. [47] 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 PIARINEN [48] ont observé des retraits plastiques deux à trois fois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés (Figure 2.7).

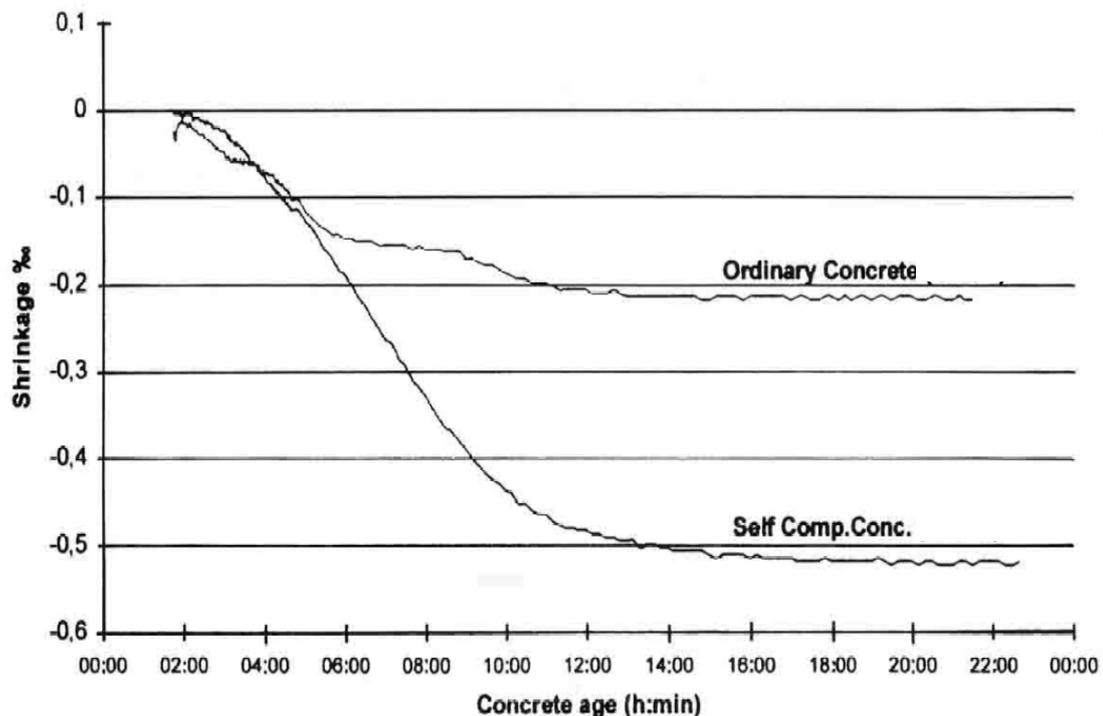


Figure 2.7: Retrait plastique de BAP et de béton vibré [48].

Il a été montré que le superplastifiant a également son influence. Il retarde la prise et augmente l'effet de l'évaporation. En conséquence, l'amplitude du retrait plastique augmente avec le dosage en superplastifiant (Figure 2.8).

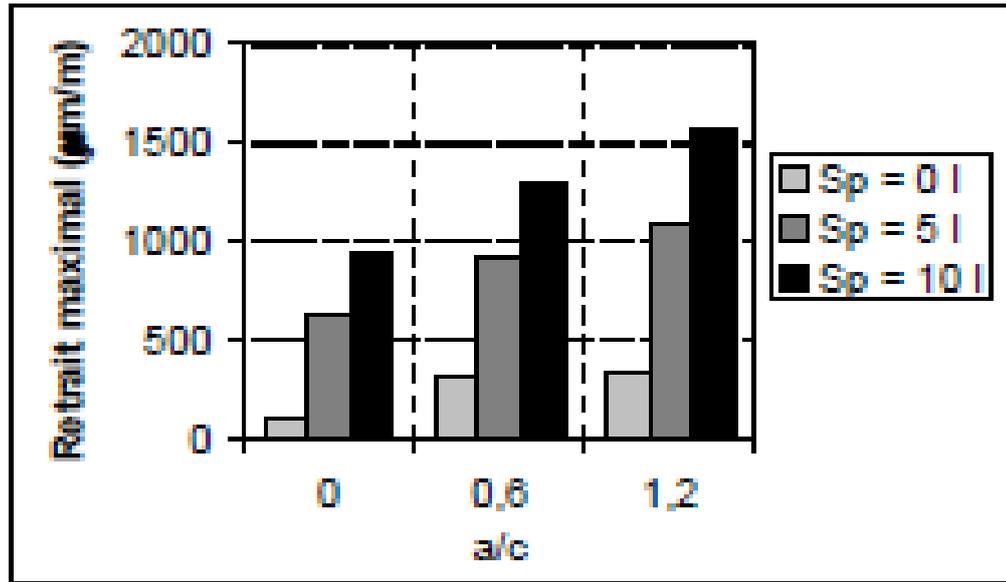


Figure 2.8 : Effet du dosage de superplastifiant sur le retrait maximal [46].

TURCRY [46], a constaté que la nature des fines influence le retrait plastique. Le retrait plastique 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 2.9).

LOUKILI et al. [49] 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.

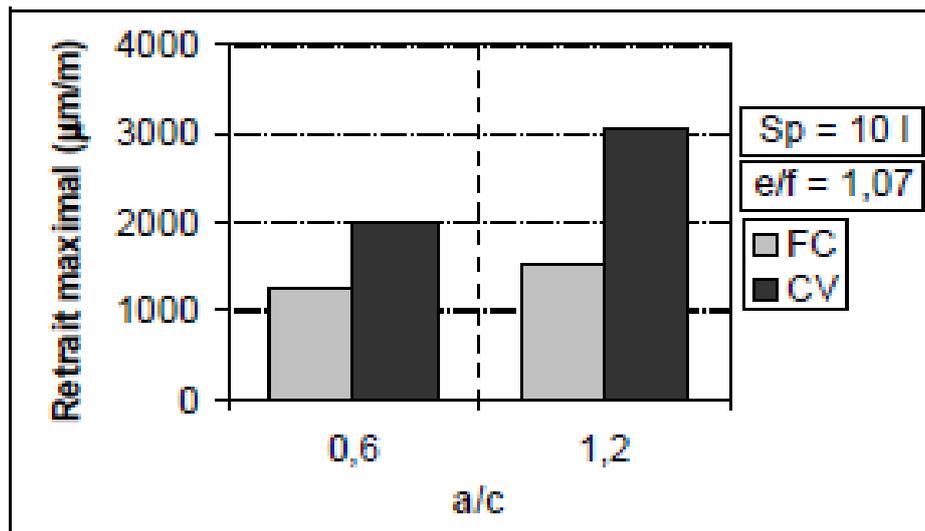


Figure 2.9 : Effet de l'addition de cendres volantes sur le retrait maximal [46].

## 2.5. Retrait endogène

### 2.5.1. Définition et mécanisme du 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.

En effet, 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 mathématiquement par l'équation suivante et schématiquement dans la figure 2.10:

$$\Delta V = V_h - (V_e + V_a) \dots \dots \dots (2.4)$$

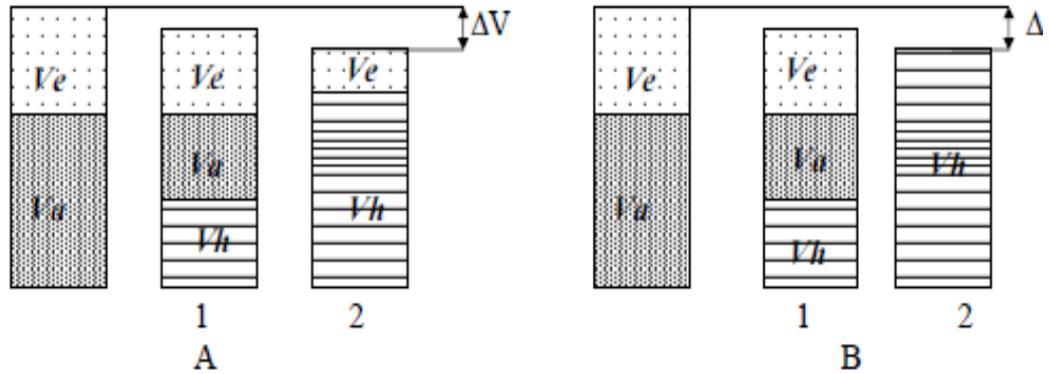


Figure 2.10: Présentation du volume apparent et du volume absolu [50].

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. La figure 2.11 montre clairement les deux phases : retrait chimique et retrait d'autodessiccation.

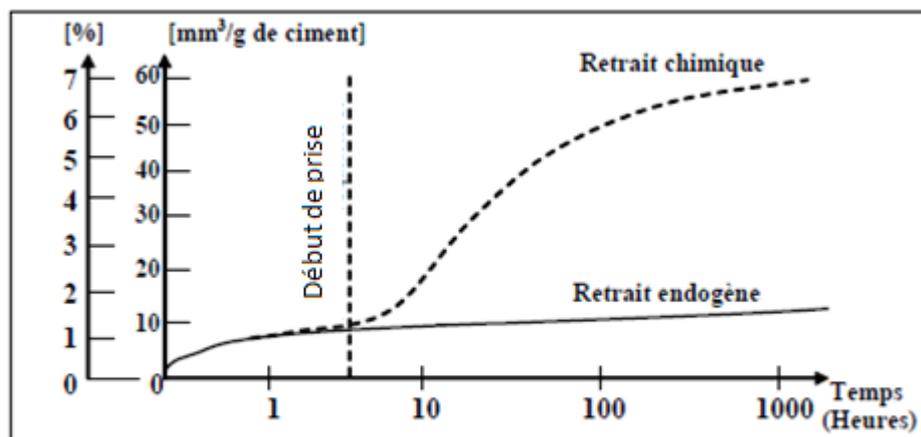


Figure 2.11 : Retrait chimique et retrait endogène d'une pâte de ciment [50].

D'après BOUASKER et al. [50-51], 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 endogène n'évolue que très lentement alors que le retrait chimique continue de croître.

### 2.5.2. Paramètres influençant le retrait endogène

#### • *Rapport E/C*

Le rapport E/C joue un rôle important et prédominant dans la diminution de l'humidité relative interne. JIANG et al. [52], ont montré que plus le rapport E/C est faible et plus la diminution de l'humidité relative est importante par l'autodessiccation (Figure 2.12).

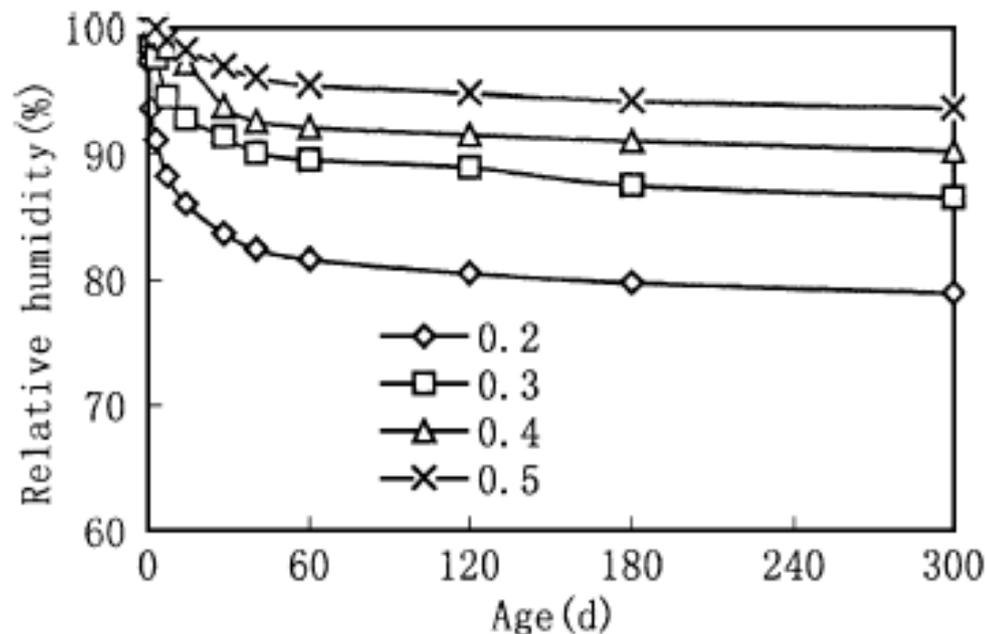


Figure 2.12 : Influence du rapport E/C sur l'humidité relative [52].

PERSSON et ZHANG [53-54], ont aussi montré que le retrait endogène est plus élevé pour des rapports eau/ciment plus faibles (Figure 2.13). Ce phénomène est expliqué par le fait que la diminution d'humidité relative interne est plus rapide et plus intense pour des rapports eau/ciment faibles. Ce phénomène est encore plus accentué pour des rapports E/C inférieurs à 0,30 [39].

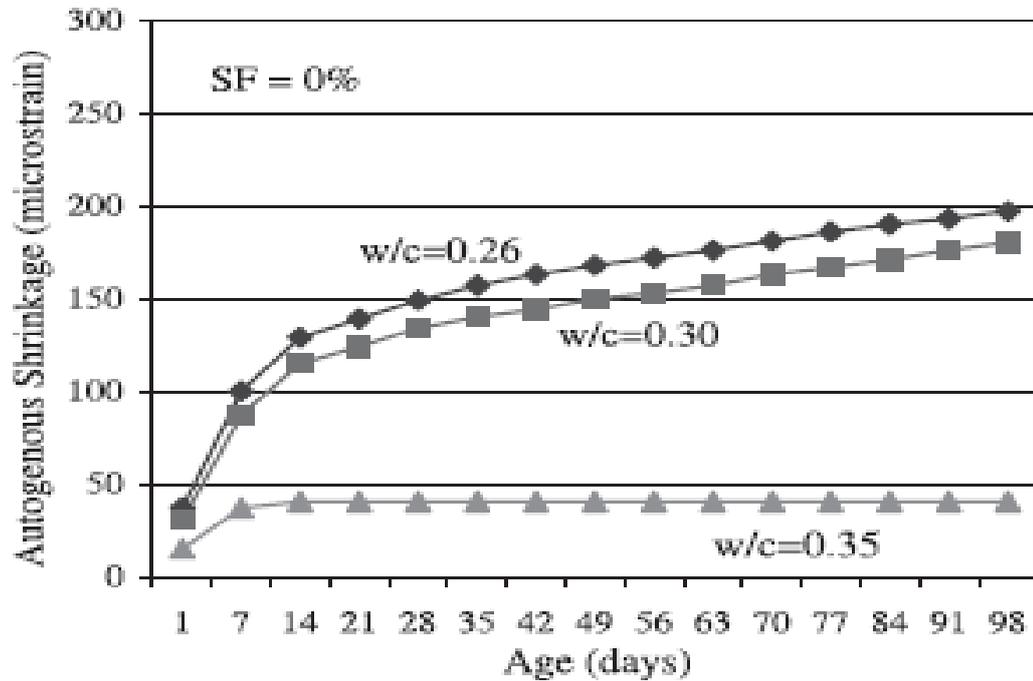


Figure 2.13 : Influence du rapport E/C sur le retrait endogène [53].

TAZAWA et MIYAZAWA [55], ont montré l'influence du rapport E/C, de la fumée de silice et des adjuvants (Figure 2.14). Les désignations des différentes pâtes sont du type N\*E/C\*100, % fumées de silice, % d'adjuvant. Par exemple : N23-10-0.6 représente : E/C = 0,23, 10 % de fumée de silice, 0,6 % d'adjuvant.

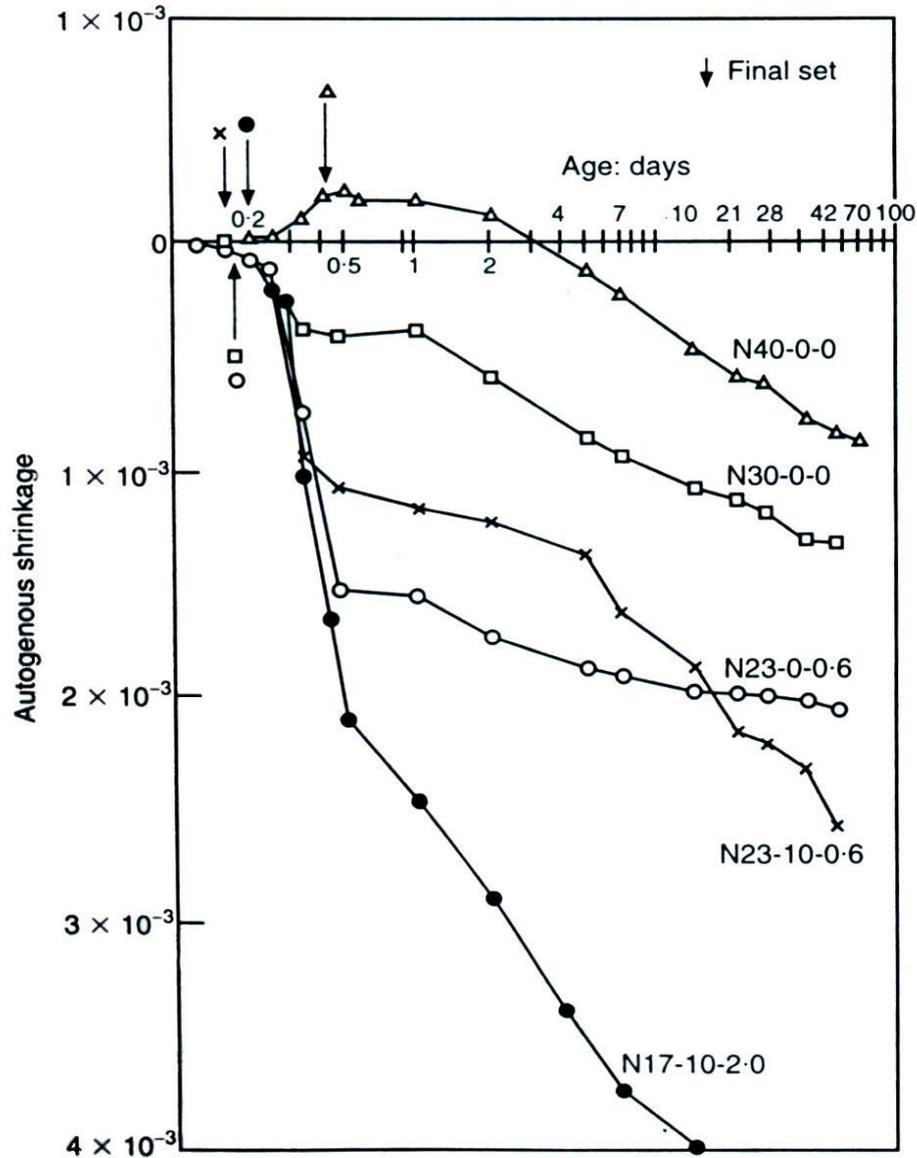


Figure 2.14: Influence du rapport E/C, adjuvant et fumée de silice sur le retrait endogène [55].

- *Nature du ciment*

Le ciment utilisé influence l'évolution du retrait endogène à la fois par sa granulométrie et sa composition minéralogique. D'un point de vue morphologique, un ciment plus fin développera un retrait endogène plus important et commençant à plus courte échéance [56]. La figure 2.15 montre l'influence de la finesse du ciment sur le retrait endogène.

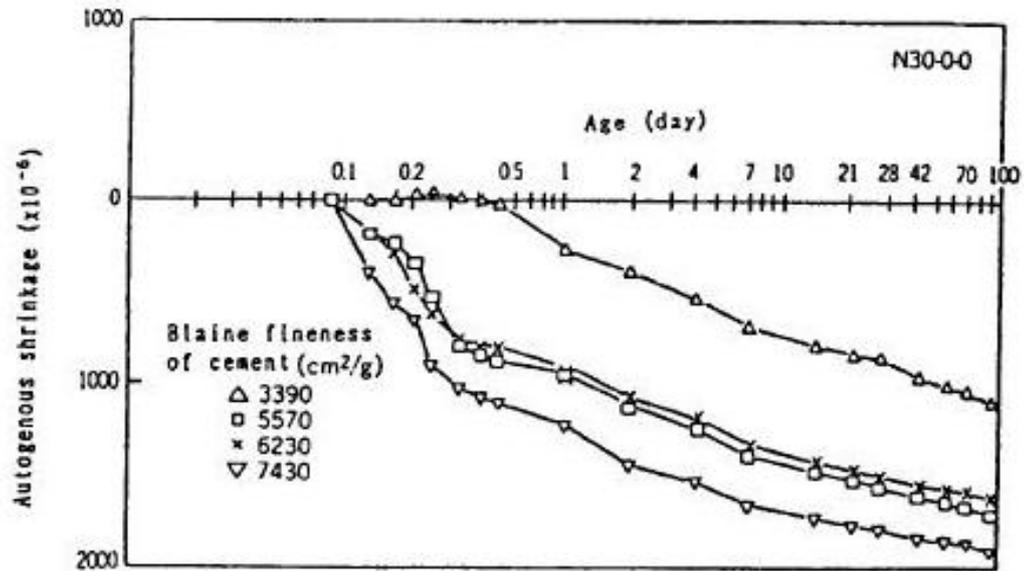


Figure 2.15: Influence de la finesse du ciment sur le retrait endogène [42].

L'effet minéralogique du ciment sur le retrait endogène n'est pas clair. L'hydratation du  $C_3A$  est à l'origine d'une diminution importante du volume absolue qui conditionne en grande partie l'amplitude du retrait endogène [57]. Cependant, JENSEN [58] a observé une diminution des déformations endogènes lorsqu'une partie du ciment est substituée par le  $C_3A$  (Figure 2.16).

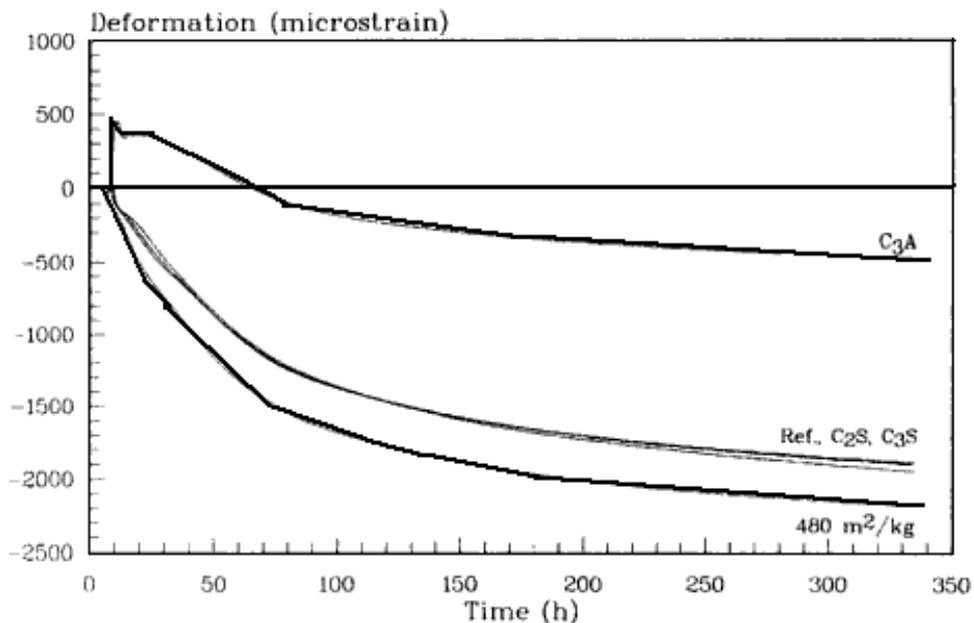


Figure 2.16: Influence de la composition du ciment sur le retrait endogène [58].

Par ailleurs, ALRIFAI et al. [56], ont montré qu'une pâte de ciment confectionnée à partir d'un ciment composé principalement de clinker (CEMI) présente un retrait plus important que celle fabriquée avec un ciment contenant un pourcentage important d'ajouts (fillers calcaire). Ceci a été expliqué par l'augmentation de la cinétique d'hydratation des mélanges de CEMI.

- *Ajouts minéraux*

La présence des particules de fumées de silice dans la matrice cimentaire donne un mélange anhydre très fin. Le raffinement des pores capillaire de la structure interne accentue l'effet de la dépression capillaire et de la diminution de l'humidité relative, par conséquent l'augmentation du retrait endogène (Figure 2.17).

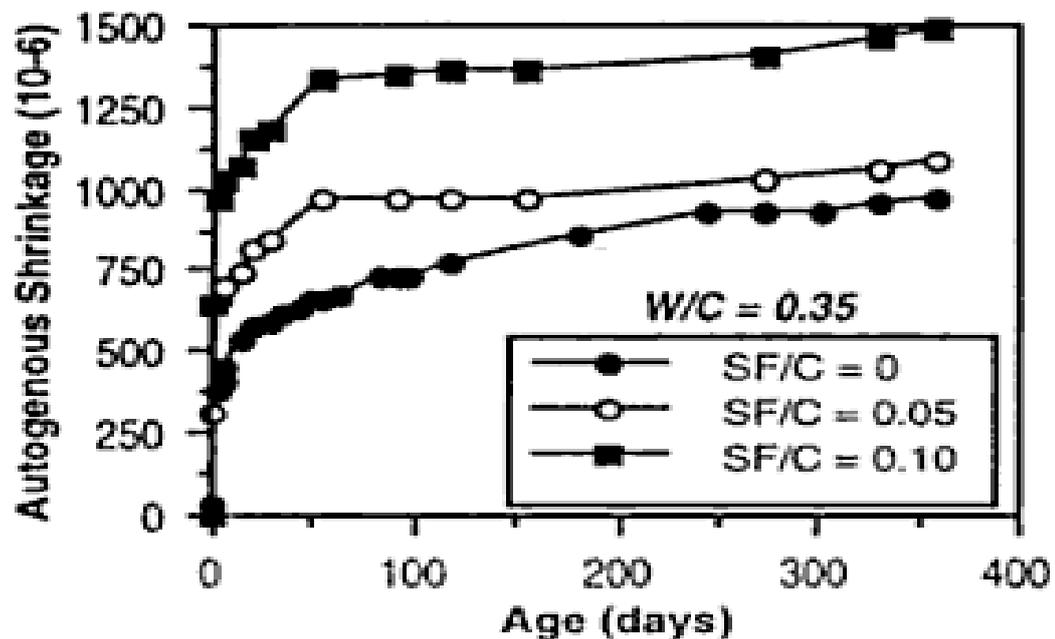


Figure 2.17: Influence de la fumée de silice sur le retrait endogène [59].

SCHIEBL et al. [60] ont constaté que les bétons contenant une quantité importante de fumées de silice présentaient un développement rapide de retrait et une déformation plus élevée après 21 jours (Figure 2.18).

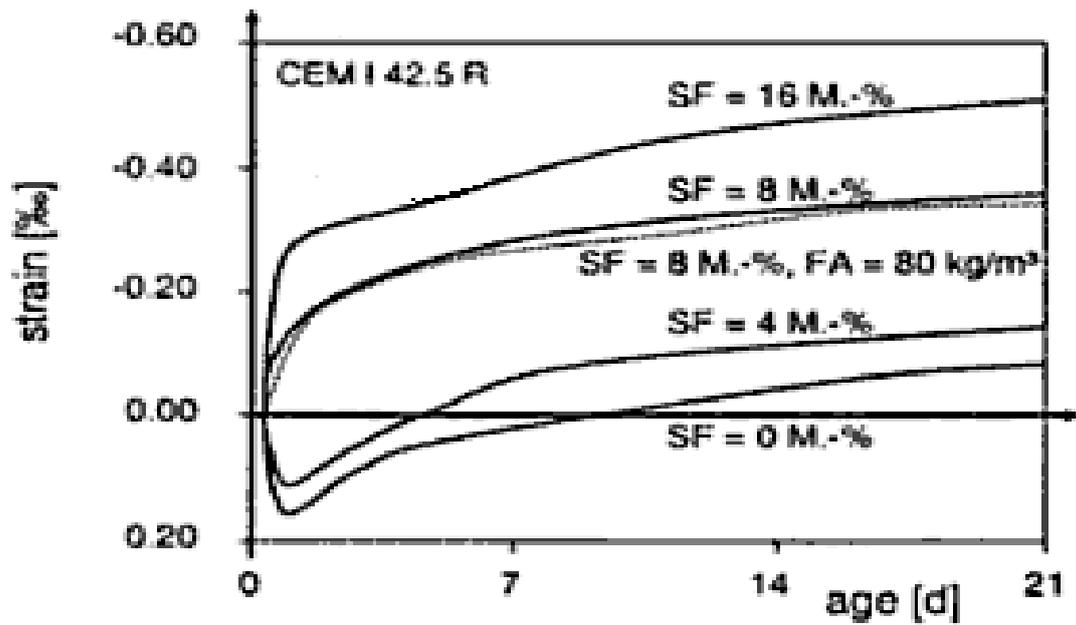


Figure 2.18: Influence de la fumée de silice sur le retrait endogène [60].

L'influence des cendres volantes se traduit par une réduction du retrait endogène (Figure 2.19), mais accompagnée d'une réduction des caractéristiques mécaniques du béton.

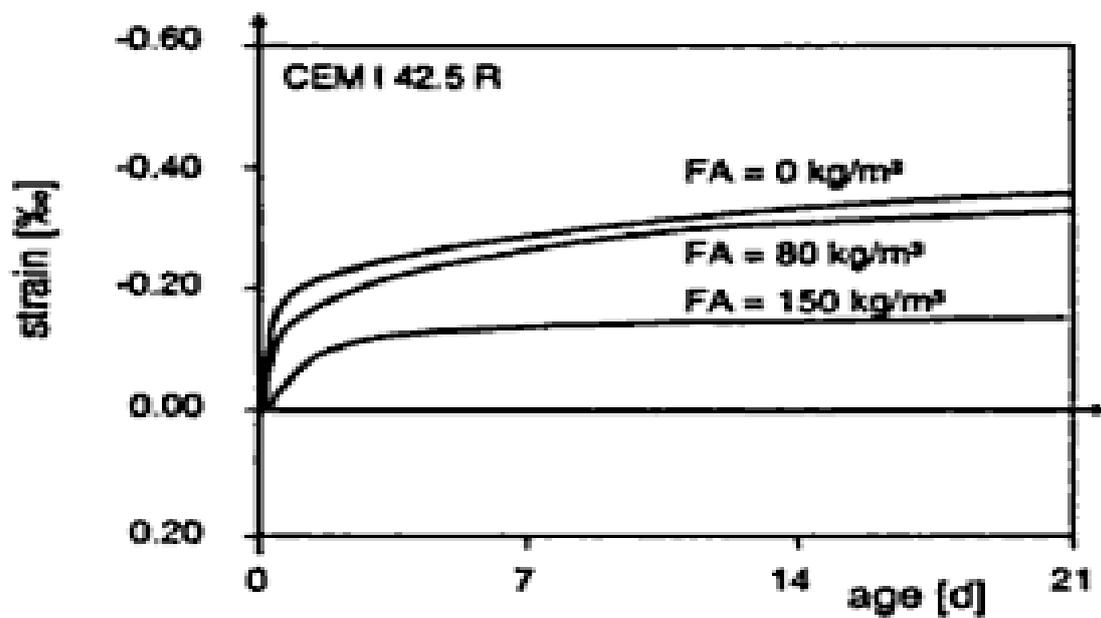


Figure 2.19: Influence des cendres volantes sur le retrait endogène [60].

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 [61]. Par ailleurs, BOUASKER [51] a étudié l'effet du laitier sur l'évolution du retrait. L'auteur a montré que le retrait endogène des pâtes de ciment à base de ciment Portland est plus important pendant les 60 premières heures. Après cet âge, il a été constaté que le retrait endogène des pâtes à base de ciment au laitier est plus important comparé avec celui du ciment Portland.

ITIM et al. [62] ont montré qu'à long terme, le mortier à 10% de laitier engendre un retrait endogène supérieur, donnant lieu à une plus forte formation d'hydrates. Par contre celui à 50% de laitier, son retrait endogène est largement inférieur conduisant à des produits d'hydratation moins nombreux (Figure 2.20).

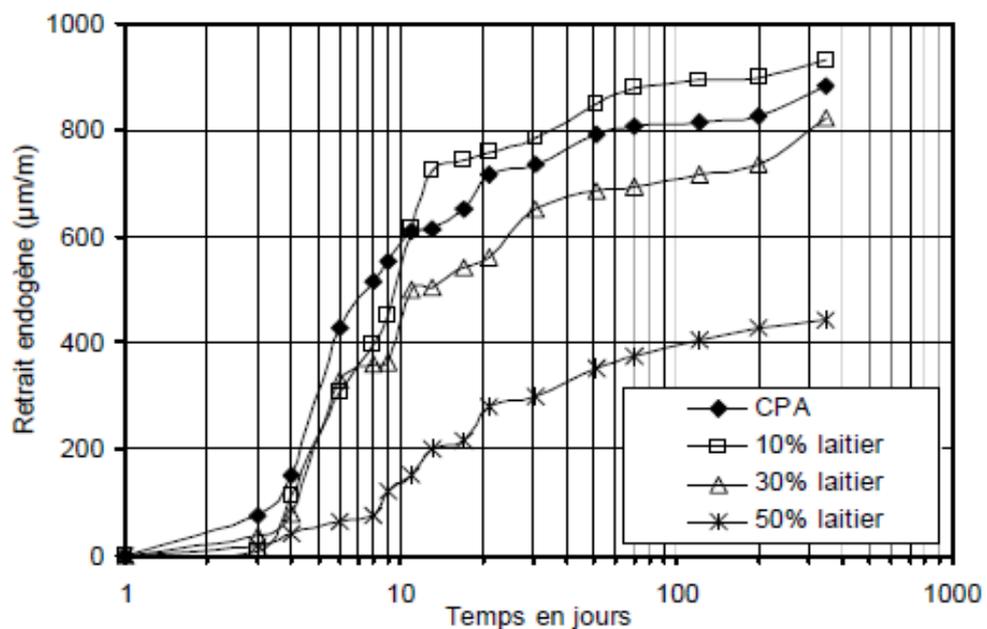


Figure 2.20 : Evolution du retrait endogène des mortiers au laitier [62].

De plus, il a été montré que la pouzzolane fait augmenter le retrait endogène au jeune âge, ceci est dû à une importante consommation d'eau par l'hydratation [62]. A long terme, Après le dixième jour, le retrait endogène des mortiers à la pouzzolane est réduit et devient nettement inférieur à celui du mortier témoin (Figure 2.21).

ITIM et al. [62] ont également étudié l'influence de calcaire sur l'évolution du retrait endogène. Il a été constaté que le calcaire fait accélérer la formation des hydrates en provoquant un retrait plus important durant la première semaine. A long terme, le retrait du mortier avec 5% de calcaire atteint celui du mortier témoin, par contre ceux avec 15 et 25 % de calcaire enregistrent une légère supériorité (Figure 2.22).

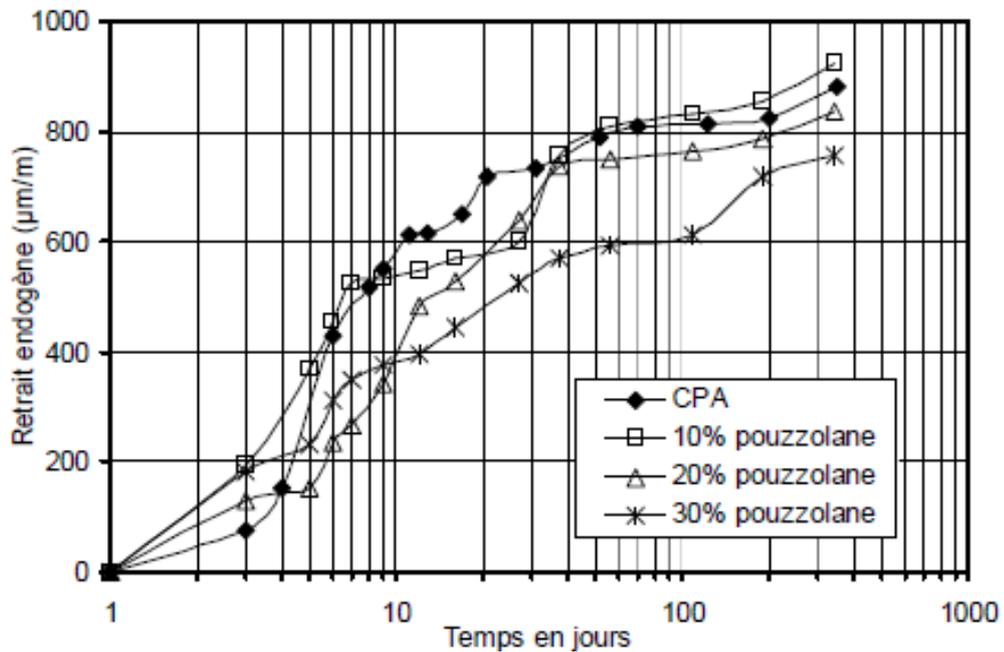


Figure 2.21 : Evolution du retrait endogène des mortiers à la pouzzolane naturelle [62].

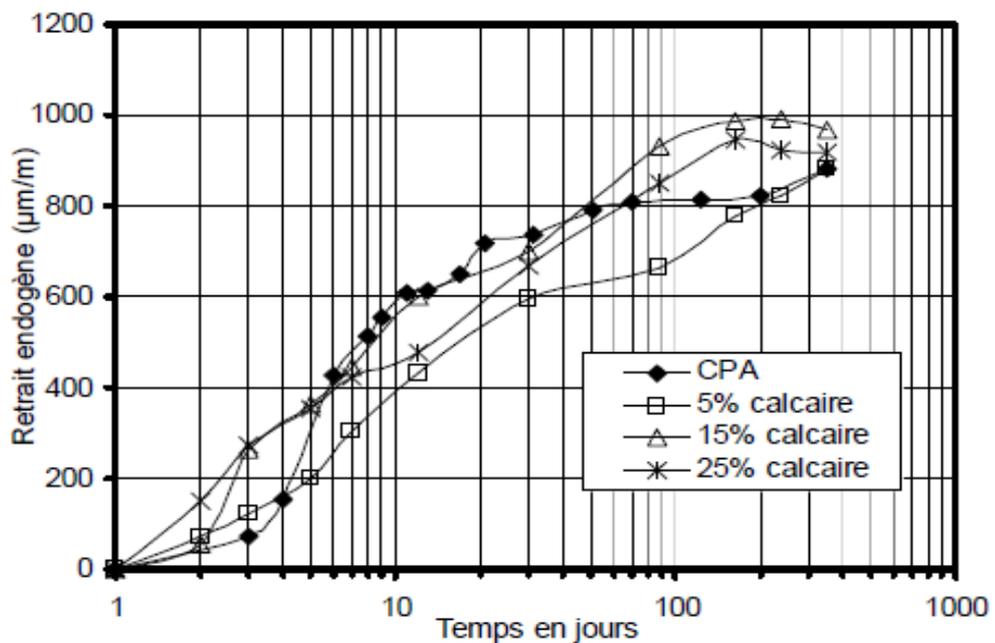


Figure 2.22 : Evolution du retrait endogène des mortiers au calcaire [62].

- **Adjuvants**

L'ajout de superplastifiant diminue l'amplitude du retrait endogène [53]. Ceci est attribué aux propriétés retardatrices des superplastifiants sur la cinétique d'hydratation.

En ce qui concerne le retrait endogène, les bétons autoplaçants présentent des déformations comparables à celles des bétons ordinaires [63]. D'autres auteurs attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés (Figure 2.23).

LEE et al. [64] ont constaté que le retrait endogène est plus important dans les BAP que dans les bétons ordinaires, ceci est peut être du à la présence du laitier qui engendre une structure poreuse fine provoquant ainsi la dépression dans les pores.

Par ailleurs, AYED et al. [65] ont montré qu'au jeune âge, les BAP à base de pouzzolane naturelle sont caractérisés par un retrait endogène moins important comparé à celui des BAP à base de calcaire. Cependant, à long terme, le retrait endogène du BAP contenant de la pouzzolane de vient important par rapport à celui contenant du calcaire (Figure 2.24).

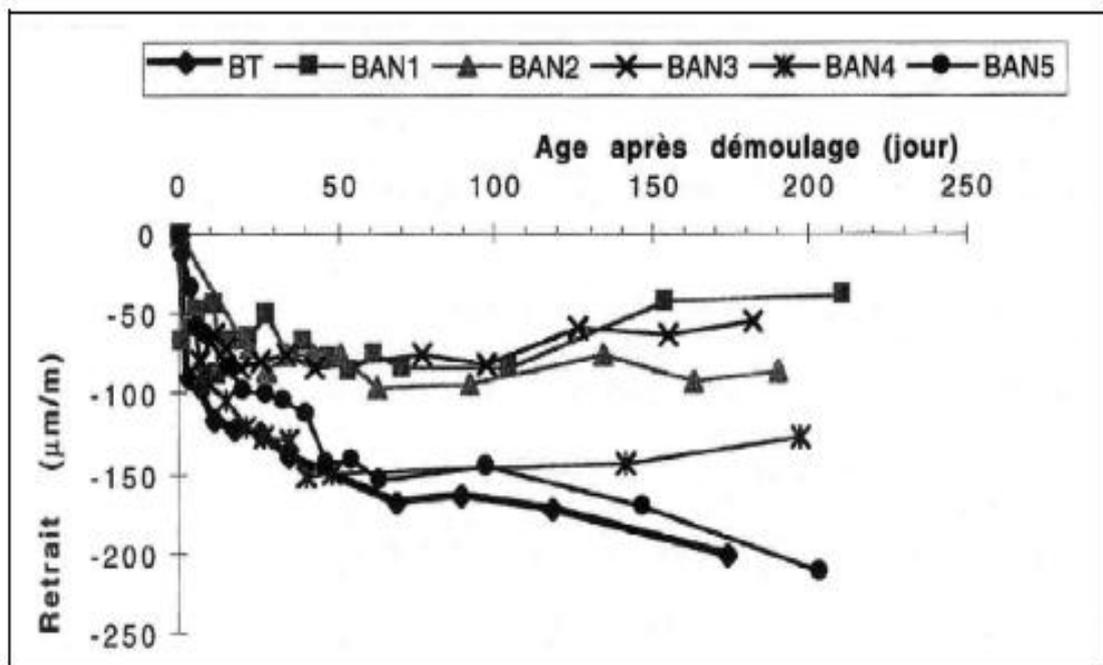


Figure 2.23 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP [32].

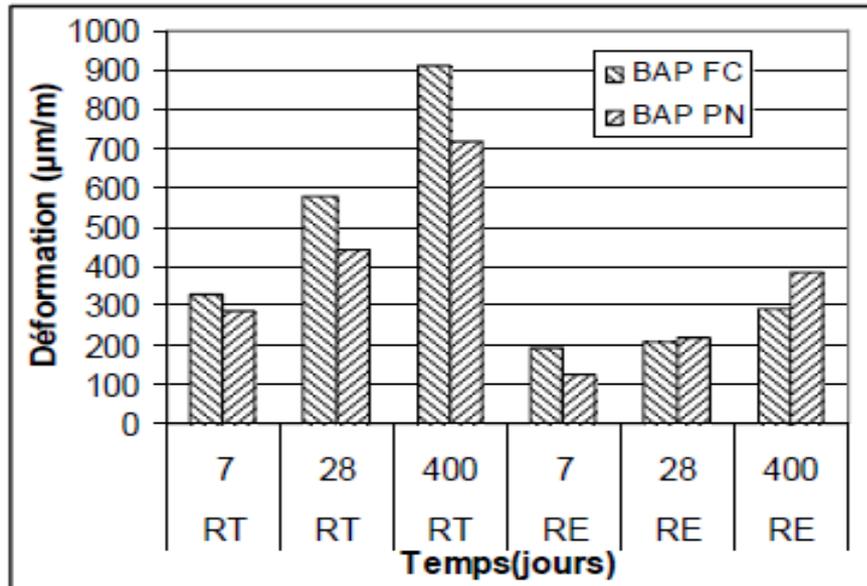


Figure 2.24 : Evolution du retrait des BAP (RT : Retrait total, RE : Retrait endogène) [65].

## 2.6. Retrait de dessiccation

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 2.25.

- 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).

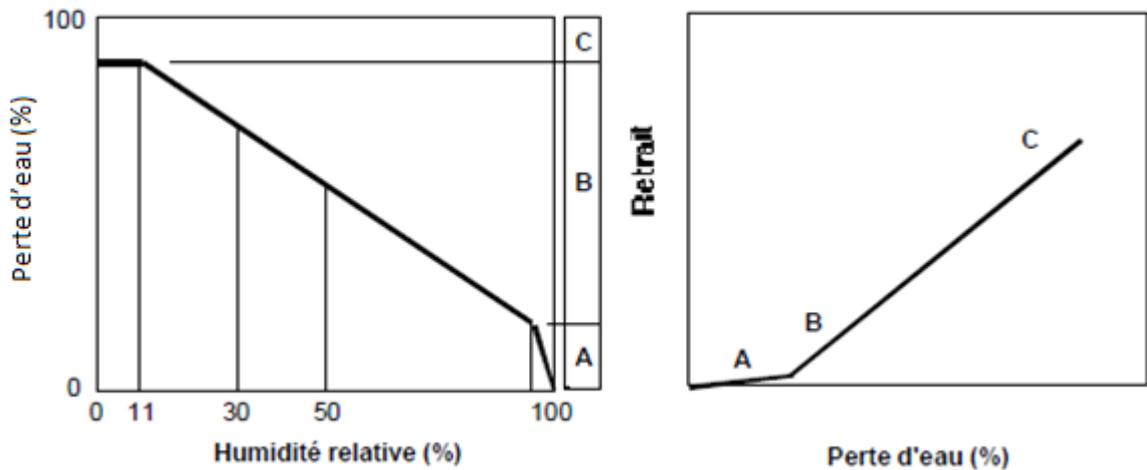


Figure 2.25: Relation entre la perte d'eau, l'humidité relative et le retrait de séchage de la pâte de ciment hydraté [42].

- A: Eau libre (grands pores capillaires),
- B: Eau non libre + eau adsorbée + eau zéolithique,
- C: Eau combinée chimiquement.

Certains auteurs ont observé des retraits de séchage des BAP moins importants (Figure 2.26) que ceux des bétons vibrés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). Le phénomène est dû à l'effet du volume de pâte et au rapport E/L, en effet l'augmentation du volume de la pâte pour une même quantité d'eau et la diminution du rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage [66].

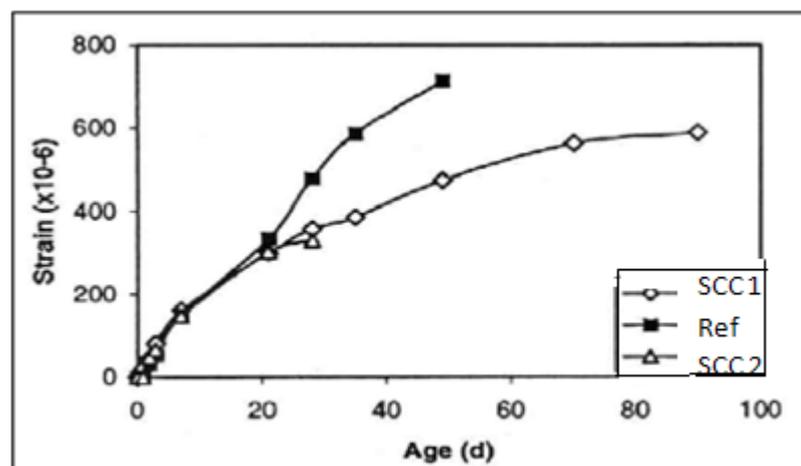


Figure 2.26: Retrait de séchage de deux BAP et d'un béton vibré [67].

Tableau 2.1: Composition des BAP SCC1 et SCC2 [67]

	E/C	E/F
SCC1	0,71	0,38
SCC2	0,59	0,37

D'autres auteurs [32] ont comparé l'amplitude du retrait des bétons autoplaçants et celle des bétons vibrés. Les auteurs ont observé des déformations plus importantes pour les BAP que celles mesurées sur béton ordinaire. La différence pourrait être supérieure à 100  $\mu\text{m}/\text{m}$  à 28 jours de séchage. L'augmentation du rapport G/S semble être bénéfique pour la réduction du retrait de dessiccation (Figure 2.27).

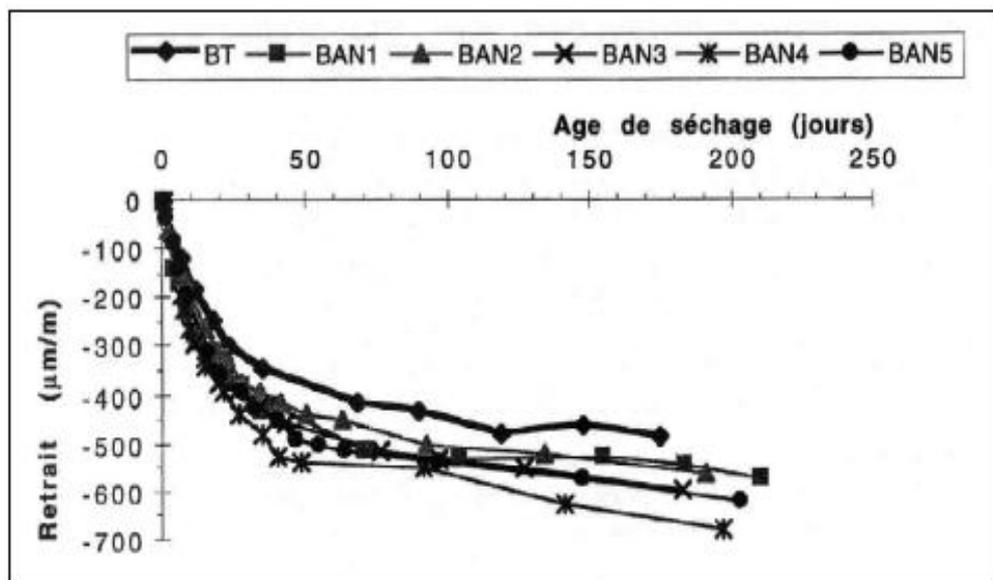


Figure 2.27 : Comparaison du retrait de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP [32].

Le retrait de dessiccation est causé par l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du béton. Le dessèchement est d'autant plus fort que la quantité d'eau initiale dans le matériau est grande. Par conséquent, les tensions générées par cette perte en eau s'amplifient également. Les BAP sont caractérisés par un rapport E/C moindre par rapport aux BV ce qui conduit à un retrait de séchage moins important (Figure 2.28).

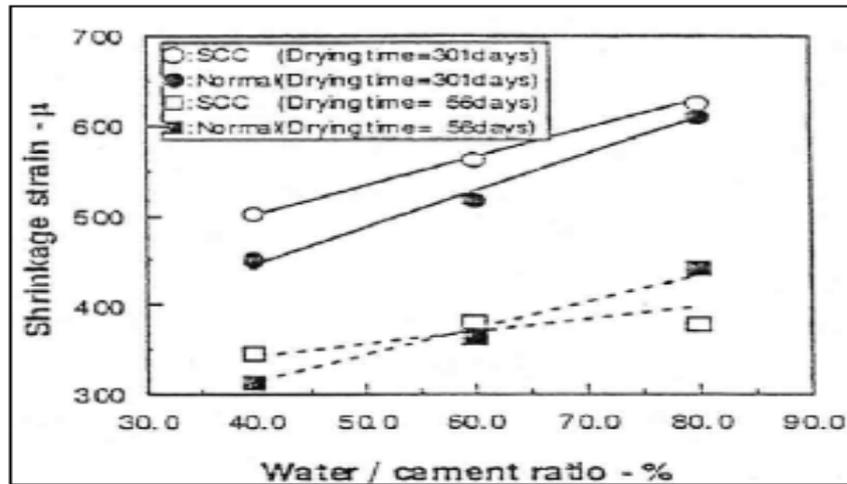


Figure 2.28: Retrait de dessiccation des BAP (SCC) et des BV de même rapport E/C [68].

Selon KHATIB [69], l'incorporation d'une importante quantité de cendres volantes dans la formulation des bétons autoplacants conduit à une diminution du retrait de séchage. En effet, l'auteur a observé une réduction de retrait de 2/3 lorsque le ciment est substitué par 80% de cendres volantes.

ITIM et al. [62] ont constaté qu'à jeune âge, les mortiers au laitier développent un retrait identique à celui du mortier témoin jusqu'à l'âge de sept jours où l'addition de 50% de laitier se manifeste par une plus forte dessiccation. A long terme, il a été conclu que l'utilisation modérée du laitier réduit le retrait en raison de l'amélioration de la qualité de la microstructure (Figure 2.29).

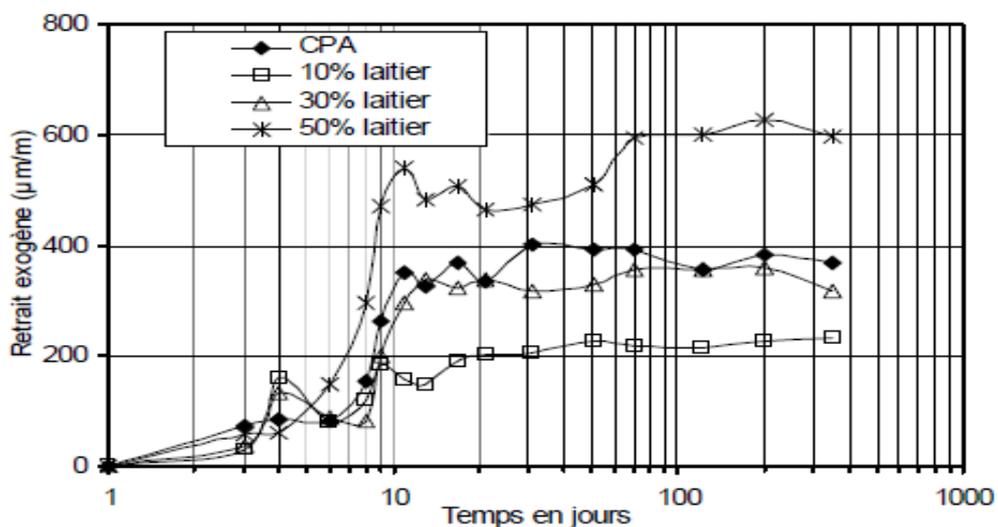


Figure 2.29: Evolution du retrait de dessiccation des mortiers au laitier [62].

Les auteurs ont également montré que les mortiers à la pouzzolane naturelle 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 presque identique (Figure 2.30). Par ailleurs, il a été montré que le calcaire fait diminuer le retrait de séchage, ceci est dû au raffinement des pores empêchant ainsi la dessiccation (Figure 2.31).

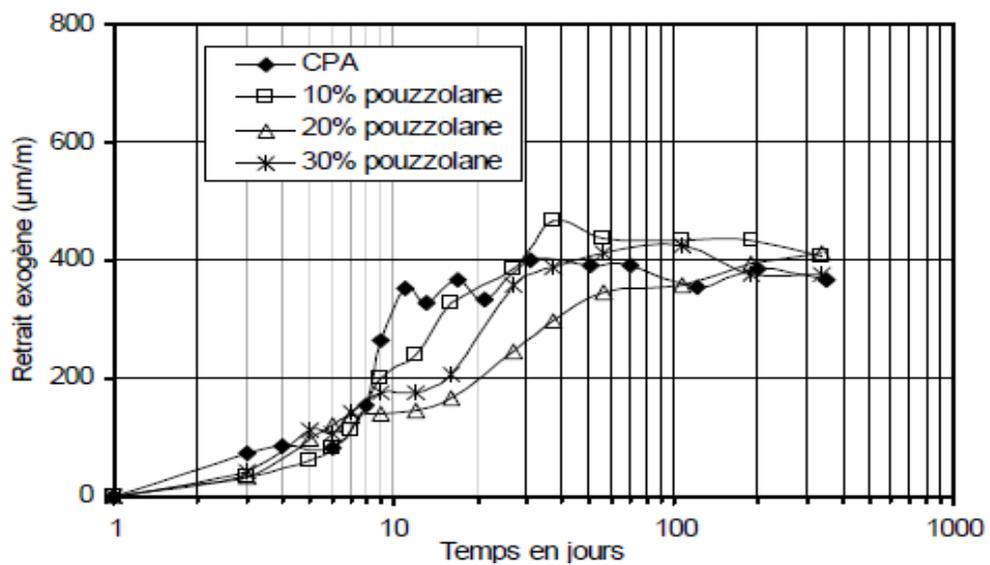


Figure 2.30: Evolution du retrait de dessiccation des mortiers à la pouzzolane naturelle [62].

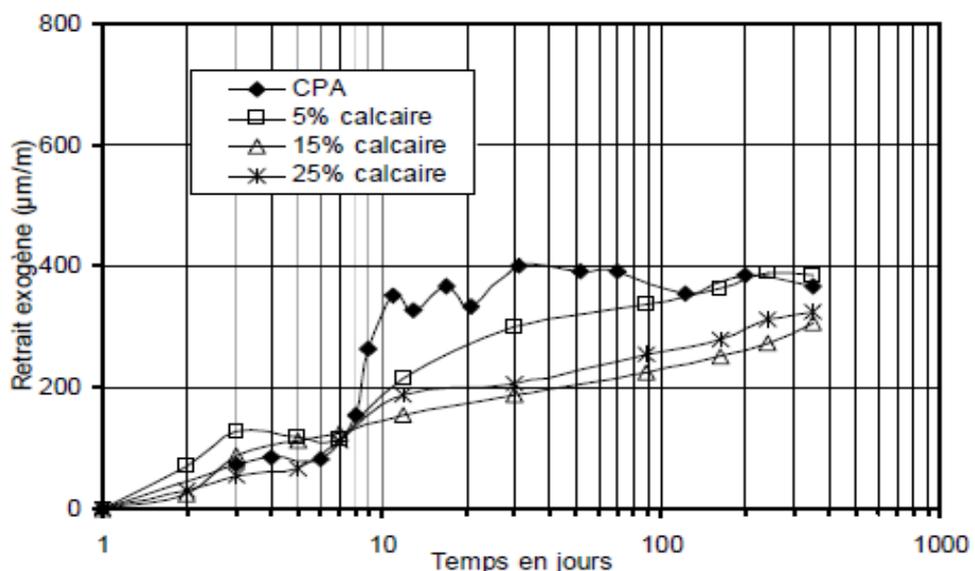


Figure 2.31: Evolution du retrait de dessiccation des mortiers au calcaire [62].

### 2.7. Retrait thermique

Le mécanisme du retrait thermique peut être expliqué comme ceci : au début de la prise, les réactions chimiques d'hydratation qui sont exothermiques dégagent de la chaleur, la température s'élève et le béton se dilate. A la fin de la prise, les réactions sont très ralenties et la température baisse progressivement grâce à la dissipation de la chaleur à travers les coffrages. C'est la contraction qui accompagne ce refroidissement qui caractérise le retrait thermique. Celui-ci se manifeste de manière plus brutale encore après le décoffrage jusqu'à ce que la chaleur d'hydratation ait pu se dissiper totalement. Le gradient thermique créé entre le cœur du béton et sa surface peut provoquer la mise en tension et la fissuration de celle-ci.

### 2.8. Retrait de carbonatation

Lors de la réaction de carbonatation, les composés calciques issus de l'hydratation, principalement la Portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$ , réagissent avec le gaz carbonique  $\text{CO}_2$  de l'air pour former du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  et de l'eau conformément au schéma réactionnel simplifié suivant :



La transformation cristallographique de la Portlandite en calcite s'accompagne d'une légère diminution du volume. C'est un retrait qui commence à la surface du béton et qui se dirige vers le cœur du béton au fur et à mesure de l'avancement de la carbonatation. Ce retrait est faible en comparaison aux autres types de retrait.

### 2.9. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des différents types de retraits aux quels sont sujets les bétons, ainsi que les mécanismes à l'origine de ces déformations et les principaux paramètres influençant leur cinétique et leur amplitude. Au terme de cette analyse, nous pouvons retenir les principaux points :

- Le retrait des bétons autoplaçants dépend fortement de leur composition.
- La nature des fines ainsi que leur finesse influence considérablement le retrait des BAP.
- La substitution de 10% de laitier fait augmenter le retrait endogène. Lorsque la teneur en laitier est supérieure à 10%, l'amplitude du retrait endogène est réduite proportionnellement aux taux de substitution. Cependant, à long terme, l'utilisation modérée du laitier réduit le retrait de dessiccation.
- La pouzzolane fait augmenter le retrait endogène à jeune âge. A long terme, sa valeur est réduite comparée à celle d'un mortier témoin. Par ailleurs, A long terme, la présence de pouzzolane engendre un retrait de dessiccation identique de celui du mortier témoin.
- Peu d'études ont été réalisées sur l'effet de la finesse des ajouts minéraux sur le retrait des bétons autoplaçants.

## **Partie II**

### **PROCEDURE EXPERIMENTALE**

## **Chapitre 3**

# **MATERIAUX, FORMULATION ET METHODES D'ESSAIS**

## CHAPITRE 3

### MATERIAUX, FORMULATION ET METHODES D'ESSAIS

#### 3.1. Généralités

Ce chapitre est consacré dans une première partie à la présentation de l'ensemble des matériaux utilisés dans le cadre de ce travail, à savoir : le ciment, les additions minérales (pouzzolane naturelle, laitier), les granulats (sable), l'adjuvant et l'eau de gâchage. Dans une seconde partie, nous décrivons la méthode de formulation adoptée et nous présenterons par la suite les différents essais réalisés au cours de notre étude.

#### 3.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

##### 3.2.1. Le Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment de type CEMI 42,5 issu de l'usine de Lafarge. L'analyse de l'influence des additions minérales (nature, teneur et finesse) sur les performances des mortiers autoplaçants a imposée le choix de ce ciment sans ajouts. Les propriétés physiques et mécaniques sont présentées dans le tableau 3.1 :

Tableau 3.1 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment

Rc vraie à 28 (MPa)	$\rho_{abs}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{app}$ (kg/m <sup>3</sup> )	SSB (cm <sup>2</sup> /g)	Début de prise (h)	Fin de prise (h)
44,10	3050	1200	3000	2h15	5h25

Tableau 3.2 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment

Composition chimique (%)									
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Perte au feu	Résidus insolubles
63,4	21,06	3,6	4,47	1,85	2,00	0,13	0,57	2,53	0,65
Composition minéralogique (%)									
C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S		C <sub>3</sub> A		C <sub>4</sub> AF		Ajouts	
67,40		9,89		1,98		13,59		Sans	

### 3.2.2. Les Additions minérales

Nous avons utilisé dans notre étude deux types d'additions pour la substitution du ciment : le laitier et la pouzzolane naturelle. Afin de pouvoir utiliser ces additions dans les différentes formulations du mortier autoplaçant (MAP), nous avons procédé à leur étuvage à 50 C° jusqu'à obtenir une masse constante et ceci dans le but de faciliter le broyage. Les additions ont été ensuite broyées à trois finesses différentes : 3500, 4200, 5000 cm<sup>2</sup>/g. Pour le broyage des additions, nous avons utilisé un broyeur à boulets du laboratoire de chimie industrielle à l'Université de Blida (Figure 3.1).



Figure 3.1 : Broyeur à boulets.

La figure 3.2 présente la variation de la finesse des additions minérales (pouzzolane de Béni-Saf, laitier d'El Hadjar) utilisées dans notre étude en fonction du temps de broyage.

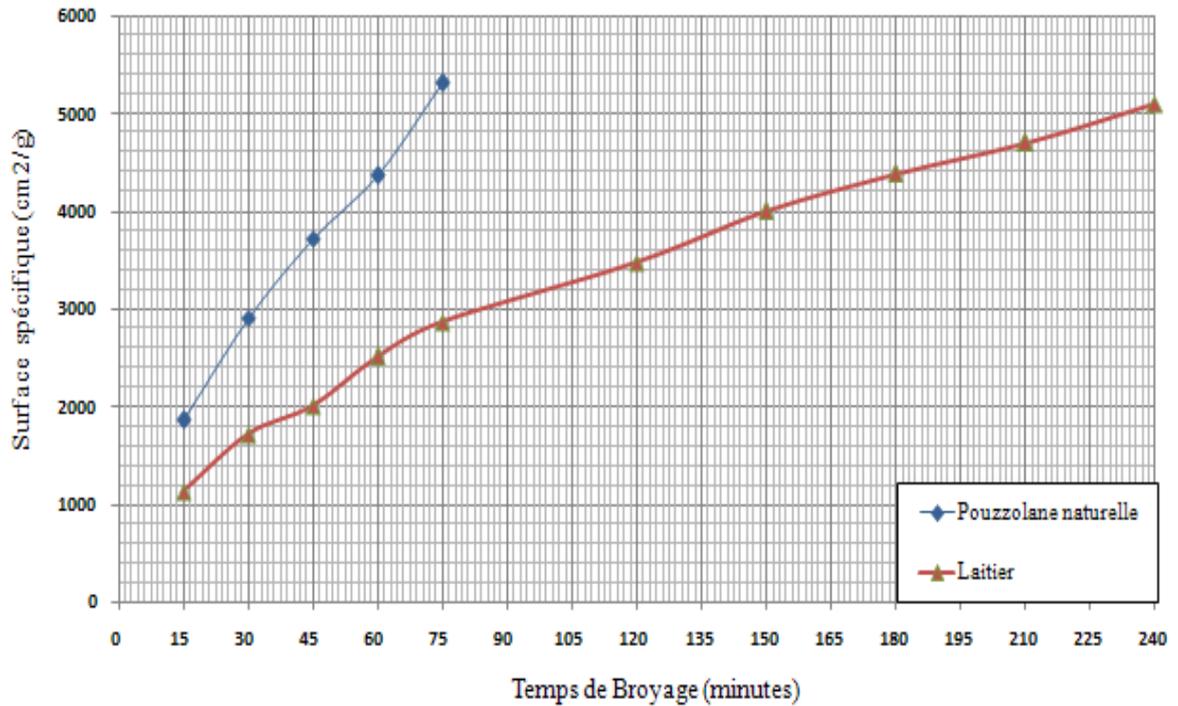


Figure 3.2 : Variation de la finesse des ajouts minéraux en fonction du temps de broyage.

### 3.2.2.1. La pouzzolane naturelle

La pouzzolane utilisée dans notre recherche provient de la région de Béni-Saf (Figure 3.3). Cette pouzzolane de couleur grise est fournie sous forme de pierres concassées et est ensuite broyée à trois finesses différentes : 3500, 4200, 5000 cm<sup>2</sup>/g. Le temps de broyage a été fixé à 43, 57 et 70 min respectivement. Sa masse volumique absolue est de 2810 kg/m<sup>3</sup>. Sa composition chimique est donnée dans le tableau 3.3 :

Tableau 3.3 : Caractéristiques chimiques de la pouzzolane de Béni-Saf

Composition chimique (%)									
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	CaCO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	HCl	Ia
45,67	15,10	10,14	8,98	3,45	3,00	-	0,19	nul	0,81

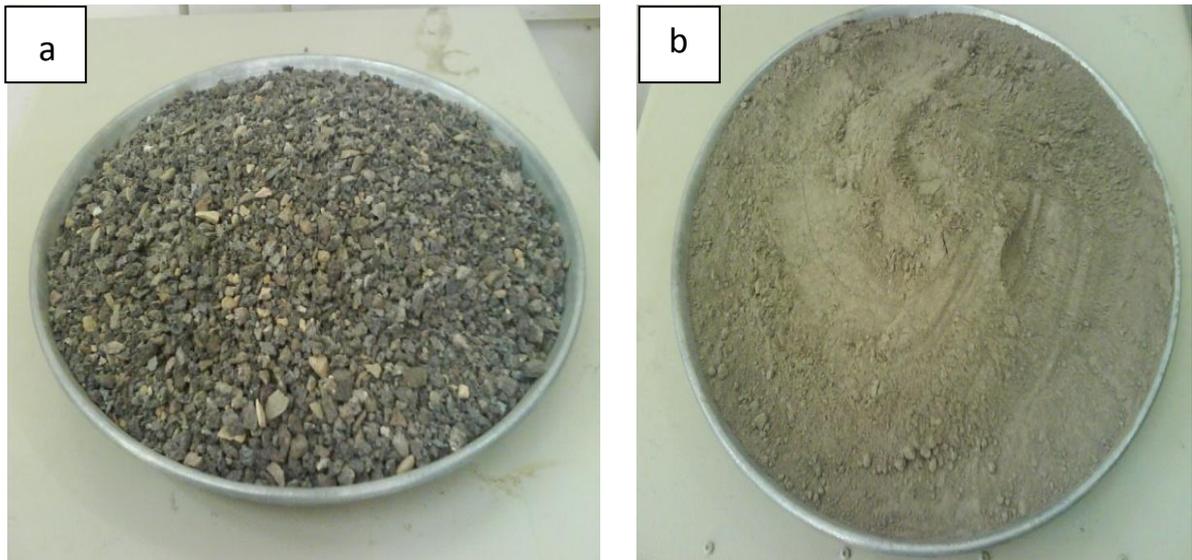


Figure 3.3 : Pouzzolane naturelle : (a) avant broyage, (b) après broyage.

#### 3.2.2.2. Le laitier

Le laitier utilisé provient du complexe sidérurgique d'El-Hadjar. Il est fourni sous forme de grains sphériques de couleur jaunâtre (Figure 3.4). Le laitier est ensuite réduit en poudre à trois finesses différentes : 3500, 4200, 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Le temps de broyage est fixé à 125, 165 et 234 min respectivement. Sa masse volumique absolue est de  $2850 \text{ kg/m}^3$ . Les résultats de sa composition chimique sont fournis dans le tableau 3.4 :

Tableau 3.4 : Caractéristiques chimiques du laitier d'El Hajar

Composition chimique (%)									
Si O <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ca O	MgO	MnO	K <sub>2</sub> O	S O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Total
40,10	6,00	2,00	42.20	4,70	2,60	1,20	0,15	1,20	101,15

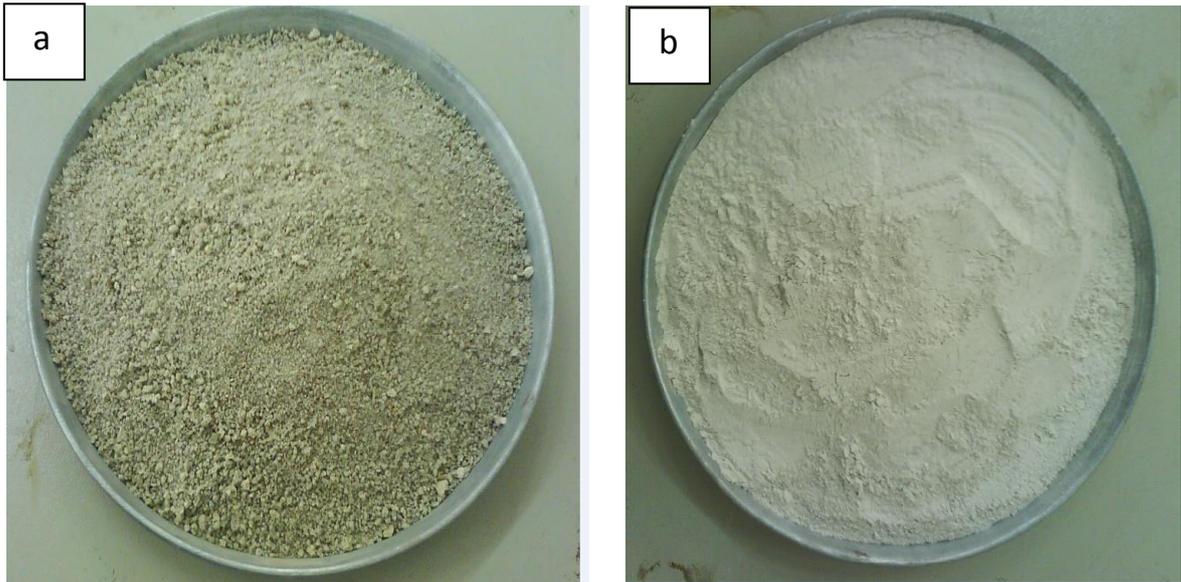


Figure 3.4: Laitier de haut fourneau : (a) avant broyage, (b) après broyage.

### 3.2. 3. Le sable

Le sable utilisé est un sable d'oued provenant de la région de Baghlia (Figure 3.5). C'est un sable dont les grains sont caractérisés par une forme roulée de classe granulaire 0/5 mm, ayant les caractéristiques suivantes (Tableau 3.5). La courbe granulométrique du sable se présente sur la figure 3.6



Figure 3.5: Sable de Baghlia.

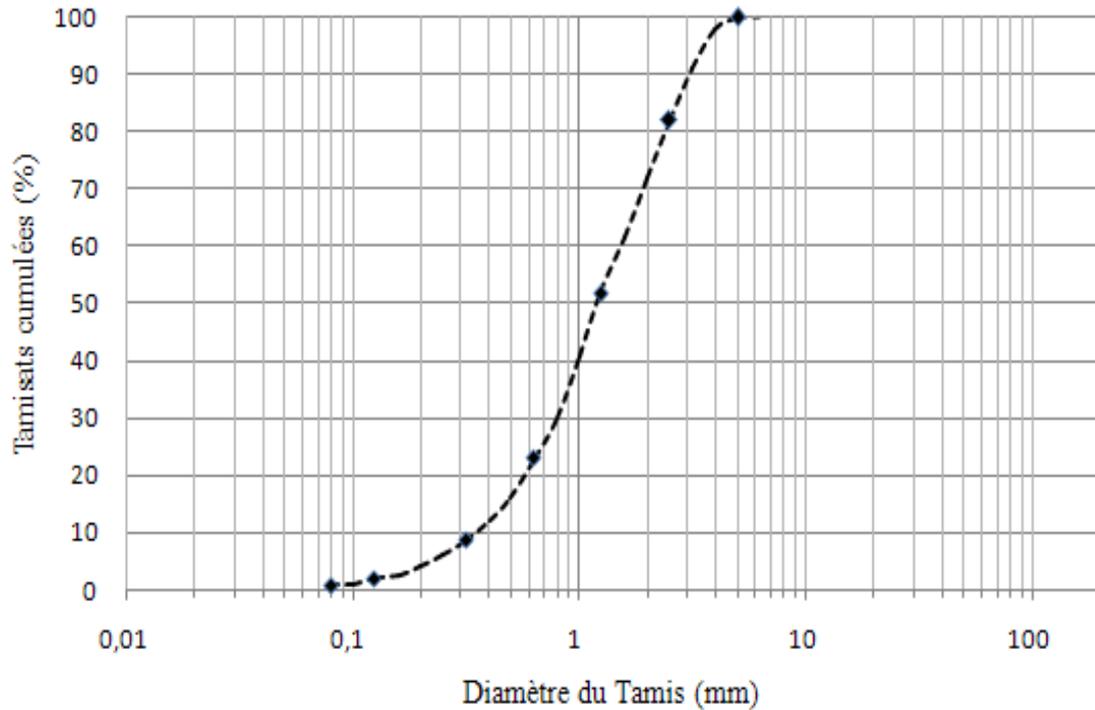


Figure 3.6: Courbe granulométrique du sable.

Tableau 3.5 : Caractéristiques du sable de Baghlia

$\rho_{abs}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficient d'absorption (%)	Humidité (%)	Module de finesse	Equivalent de sable (%)
2560	1,10	1,67	3,32	82,6

#### 3.2. 4. Le superplastifiant

Le superplastifiant utilisé dans l'ensemble des formulations nous a été fourni par la société Granitex ; C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau de type polycarboxylate (Medaflo 30). Selon la fiche technique, le pourcentage du superplastifiant doit être compris entre 0,5 et 2% du poids de ciment. Les caractéristiques du superplastifiant utilisé sont résumées dans le tableau 3.6 :

Tableau 3.6 : Caractéristiques du superplastifiant

Forme	Liquide
Couleur	Marron
Densité	1,07
Extrait sec (%)	30

### 3.2. 5. L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour gâcher les mortiers autoplaçants est l'eau du robinet de notre laboratoire.

### 3. 3. Formulation du mortier autoplaçant

Notre étude est focalisée sur l'influence des additions minérales, à savoir le laitier et la pouzzolane sur les propriétés des mortiers autoplaçants. La teneur des additions dans le mortier est fixée au préalable pour l'ensemble des formulations. Afin de déterminer les quantités des autres matériaux : sable, ciment, eau et adjuvant, nous nous sommes basés sur la méthode Japonaise (méthode générale) proposée par OKAMURA, avec quelques modifications apportées au niveau de la détermination de la teneur en sable dans le mortier (S/M), le rapport eau/liant (E/L) ainsi que le rapport superplastifiant/liant (SP/L) et ceci dans le but de s'adapter avec les exigences des matériaux locaux et d'obtenir de bonnes caractéristiques du mortier à l'état frais. BOUKENDAKDJI [70], dans ses travaux de recherche a ajusté le rapport S/M et SP/L de manière à avoir un diamètre d'étalement de la galette du mortier compris entre 270 et 330 mm et un temps d'écoulement à l'entonnoir en V compris entre 2 et 10 s. Il est à noter que les essais ont été effectués sur un mortier de référence (un mélange sans ajouts minéraux). Dans notre étude, nous nous sommes basés sur les travaux de BOUKENDAKDJI [70]. Le rapport S/M a été fixé à 0,5 et le rapport E/L à 0,4 [70]. En ce qui concerne l'optimisation du dosage en superplastifiant, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement de la galette et le temps d'écoulement du mortier au V- funnel en fonction de la variation de la teneur en polycarboxylates (PC) de 1,2 à 2,2% du poids du liant. De la même manière, les essais d'optimisation du rapport SP/L ont été effectués sur un mortier ne contenant pas d'additions minérales.

## Malaxage du mortier

Pour la confection du mortier, nous avons utilisé un malaxeur de 5 litres de capacité (Figure 3.7). La séquence de malaxage du mortier est la suivante :

Malaxer à sec les matériaux (le sable, le ciment et l'addition) pendant environ une minute dans le but d'homogénéiser le mélange ; Ajouter la première quantité d'eau ( $W1= 70\%$  de la quantité totale d'eau de gâchage) et malaxer pendant une minute ; Ajouter par la suite la deuxième quantité d'eau ( $W2= 30\%$  de la quantité totale d'eau de gâchage) mélangée avec le superplastifiant et malaxer pendant une autre minute ; En fin, malaxer le tout pendant trois minutes.



Figure 3.7: Malaxeur à mortier.

### 3. 4. Méthodes d'essais

Afin d'étudier le comportement des mortiers autoplaçants à l'état frais, nous avons réalisé l'essai d'étalement au mini cône et l'essai d'écoulement au V- Funnel. En ce qui concerne les essais à l'état durci, nous avons réalisé des essais de résistance à la compression et des essais de retrait (retrait total) des mortiers autoplaçants.

### 3.4. 1. Les essais à l'état frais

#### 3.4.1.1. Essai d'étalement au Mini-Cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une plaque horizontale (Figure 3.8). Après soulèvement du moule, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires, la moyenne est retenue. D'après DOMONE et al. [71], un bon mortier est caractérisé par une valeur du diamètre d'étalement comprise entre 270 et 330 mm.



Figure 3.8: Essai d'étalement pour mortier.

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

Dans l'essai V-Funnel (Figure 3.9), l'entonnoir est rempli de 1,1 litre de mortier. Cet essai consiste à 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 [71].



Figure 3.9: Essai à l'entonnoir en V pour mortier.

### 3.4. 2. Les essais à l'état durci

#### 3.4.2.1. Résistance à la compression

Les essais de résistance mécanique en compression de tous les mortiers étudiés ont été effectués sur des éprouvettes de forme prismatique de dimensions  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ . Pour chaque gâchée et chaque âge, trois prismes ont été confectionnés. Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées dans un bac rempli d'eau à une température de  $20 \text{ C}^\circ$  jusqu'au moment des essais. La résistance à la compression a été déterminée pour quatre échéances de conservation (3, 7, 28 et 56 jours). À l'âge requis, les éprouvettes sont brisées par flexion en deux moitiés et chaque moitié est soumise à l'essai de compression. Chaque demi prisme est centré entre les deux plateaux du dispositif de l'essai (Figure 3.10) et sur lequel est appliquée une charge croissante jusqu'à la rupture.



Figure 3.10: Dispositif pour l'essai de compression.

#### 3.4.2.2. Essai de retrait total

La mesure du retrait a été effectuée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ . Chaque éprouvette est munie de plots métalliques fixés aux deux extrémités qui serviront à la positionner sur l'appareil de mesure. 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 (Figure 3.11) de précision de  $1 \mu\text{m}$ . Selon les normes, les éprouvettes destinées pour la mesure du retrait doivent être conservées dans une pièce dont la température est maintenue à  $20 \text{ C}^\circ \pm 1$  et l'humidité relative à  $55\% \pm 5$ . L'essai de retrait a été réalisé pendant une durée de 28 jours pour tous les mélanges.



Figure 3.11: Dispositif pour l'essai de retrait

### 3.5. Récapitulatif du programme expérimental

La figure 3.12 présente un récapitulatif des essais réalisés (à l'état frais et durci) dans cette étude ainsi que les différentes variables étudiées (type d'addition, teneurs et finesses).

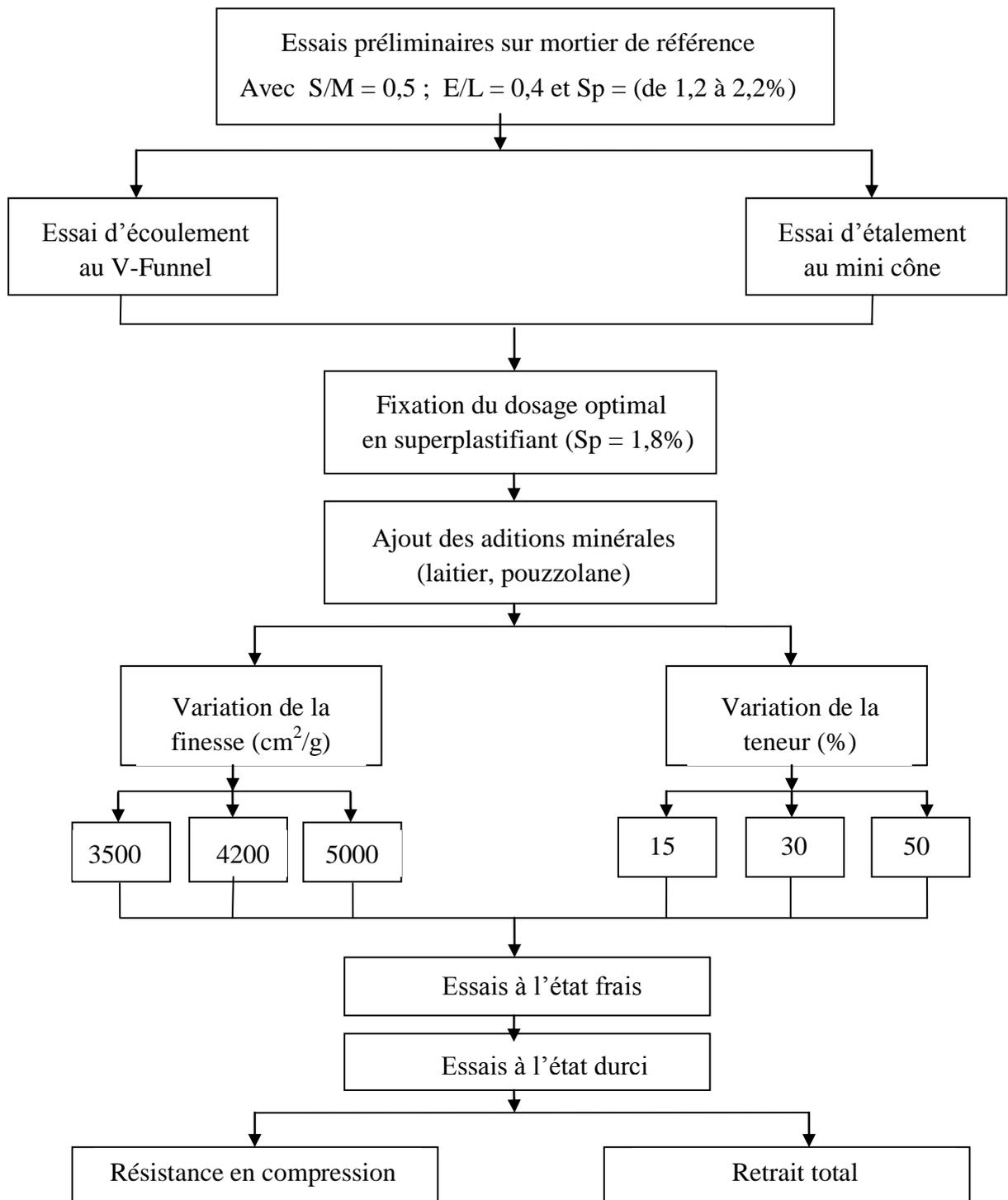


Figure 3.12: Organigramme résumant le programme expérimental de notre recherche.

## **Chapitre 4**

# **RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS**

## CHAPITRE 4 RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

### 4.1. Généralités

Nous présenterons dans ce chapitre les résultats des différents essais réalisés sur mortier à l'état frais et à l'état durci. Les résultats seront interprétés et comparés avec d'autres résultats de la littérature. En première étape, nous exposerons les résultats d'essais d'optimisation du dosage en superplastifiant (effectués sur mortier de référence). En second lieu, l'influence du laitier et de la pouzzolane ainsi que l'influence de leurs finesses sur l'ouvrabilité des mortiers autoplaçants (MAP) sera étudiée. En troisième étape d'étude, nous examinerons l'influence des ajouts et de leurs finesses sur le retrait (retrait total) des MAP ainsi que sur leurs résistances mécaniques en compression à court et à moyen terme.

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

Afin d'optimiser la composition des mortiers, nous proposons de fixer le dosage en superplastifiant et de faire varier la teneur et la finesse des ajouts. La détermination du dosage optimum en superplastifiant a été effectuée sur un mortier de référence (sans ajouts). Deux essais ont permis de réaliser cette opération : 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 le reste des formulations réalisées.

#### 4.2.1. Essai d'étalement au mini-cône

Les résultats de l'essai d'étalement des mortiers autoplaçants sont présentés dans le tableau 4.1 et illustrés sur la figure 4.1.

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

<b>Teneur en superplastifiant (%)</b>	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
Etalement (mm)	292,0	300,5	302,5	306,5	306,5	315,0
Observation	Mortier homogène	Mortier homogène	Mortier homogène	Mortier homogène	Apparition de ressuaage	Apparition de ressuaage

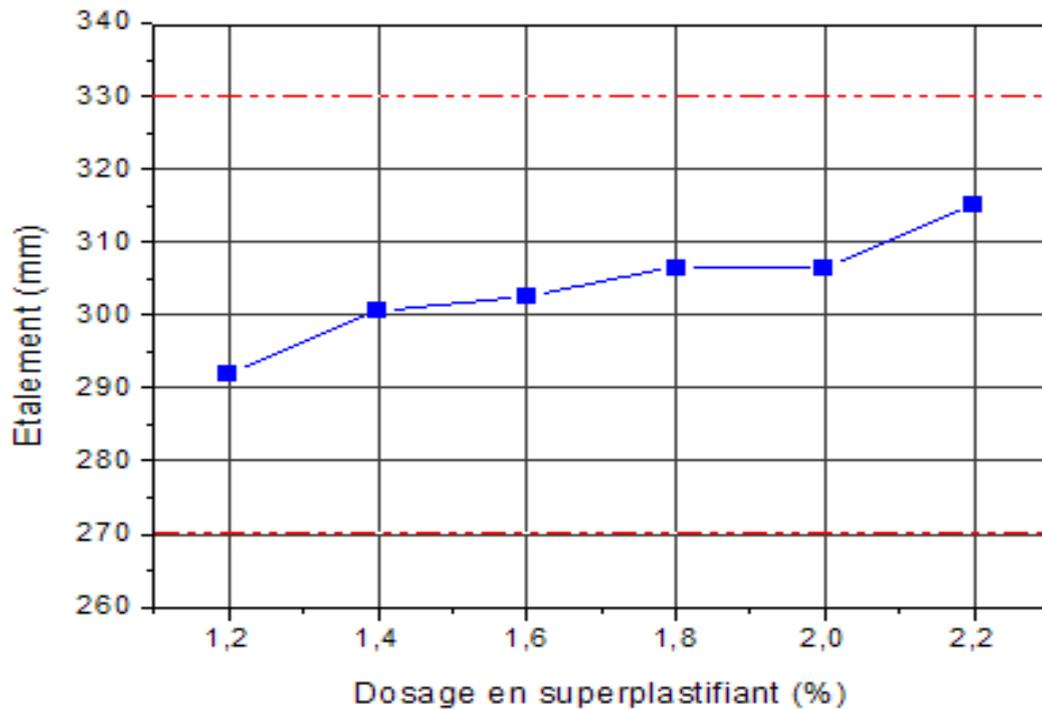


Figure 4.1: Variation de l'étalement en fonction de la teneur en superplastifiant.

Toutes les formulations des MAP réalisées avec les différents dosages en superplastifiants (de 1,2 à 2,2 %) ont donné des valeurs d'étalement comprises à l'intérieur de l'intervalle proposé par DOMONE et al [71]. Elles varient de 292 à 315 mm. Cependant, les dosages en superplastifiants de 2% et plus ont présenté un ressuage important dans les galettes des mortiers autoplacants.

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

Les résultats de la mesure du temps d'écoulement au V- Funnel des mortiers en fonction du dosage en superplastifiant sont donnés dans le tableau 4.2 et la figure 4.2.

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

Teneur en superplastifiant (%)	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
Temps d'écoulement (s)	14,9	8,5	8,11	7,48	8,47	8,1

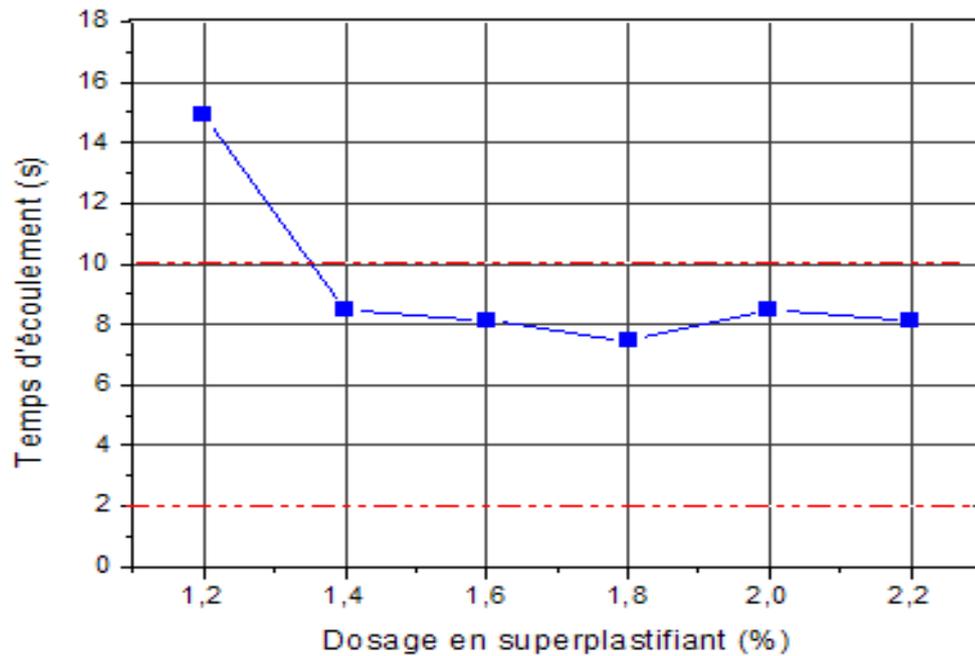


Figure 4.2: Variation du temps d'écoulement en fonction de la teneur en superplastifiant.

Le dosage de 1,2 % est rejeté car il a donné un temps d'écoulement au V-Funnel plus grand que la limite supérieure (10 s) proposée par DOMONE et al [71]. Les autres dosages de 1,4 à 2,2 % sont à l'intérieur de l'intervalle. La proportion  $Sp/L = 1,8 \%$  a donnée le plus bas temps d'écoulement au V-Funnel (7,48 s). A partir des deux essais précédents, on peut conclure que le dosage optimal du superplastifiant est de 1,8 %. Ce pourcentage sera utilisé pour le reste des formulations des MAP (à base d'ajouts). Plusieurs publications rapportent que la nature de l'addition minérale ainsi que son dosage sont des facteurs qui influencent énormément le comportement des BAP à l'état frais et à l'état durci. Afin de focaliser notre travail sur l'addition minérale (teneur et finesse), tous les mortiers autoplaçants ont été formulés avec des matériaux (sable, ciment, adjuvant) identiques. Nous avons gardé comme seules variables : la nature, la teneur et la finesse de l'ajout. Les rapports S/M, E/L et  $Sp_{opti}$  (Tableau 4.3) sont fixes pour toutes les compositions des mortiers étudiés. Il est à noter que les rapports S/M et E/L ont été fixés en se basant sur les travaux de Boukendakdji [70].

Tableau 4.3: Optimisation des mortiers étudiés

S/M	E/L	$Sp_{optimum} (\%)$
0,5	0,4	1,80

La composition des mortiers étudiés est présentée dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4: Composition des mortiers étudiés ( $V = 1,6 l$ )

Constituants		MR	MAP1	MAP2	MAP3	MAP4	MAP5	MAP6
Ciment (Kg)		1,099	0,940	0,778	0,562	0,940	0,778	0,562
Sable (Kg)		2,060	2,060	2,060	2,060	2,060	2,060	2,060
pouzzolane	(%)	0	15	30	50	-----	-----	-----
	(Kg)	0	0,153	0,307	0,517	-----	-----	-----
laitier	(%)	0	-----	-----	-----	15	30	50
	(Kg)	0	-----	-----	-----	0,155	0,311	0,523
Superplastifiant (Kg)		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Eau (Kg)		0,414	0,412	0,410	0,410	0,412	0,410	0,410

#### 4.3. Influence de la pouzzolane sur l'ouvrabilité des MAP

L'effet de la substitution du ciment par la pouzzolane à différentes teneurs et à des finesses distinctes sur l'ouvrabilité des mortiers autoplaçants est analysé en se basant sur deux essais relatifs au mortier à l'état frais. Les résultats de l'essai d'étalement au mini-cône et l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V sont résumés dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5: Résultats d'essais à l'état frais d'un mortier à base de pouzzolane

Teneur (%)	Finesse de la pouzzolane, SSB (cm <sup>2</sup> /g)					
	3500		4200		5000	
	Etalement (mm)	Temps (s) V-Funnel	Etalement (mm)	Temps (s) V-Funnel	Etalement (mm)	Temps (s) V-Funnel
0	306,5	7,48	306,5	7,48	306,5	7,48
15	299,5	6,85	298,5	7,03	295,5	8,96
30	287,5	7,27	285,5	8,44	283,0	9,73
50	285,0	12,79	280,5	16,34	277,0	16,98

#### 4.3.1. Essai d'étalement au mini-cône

La figure 4.3 montre la variation de l'étalement des mortiers à base de pouzzolane.

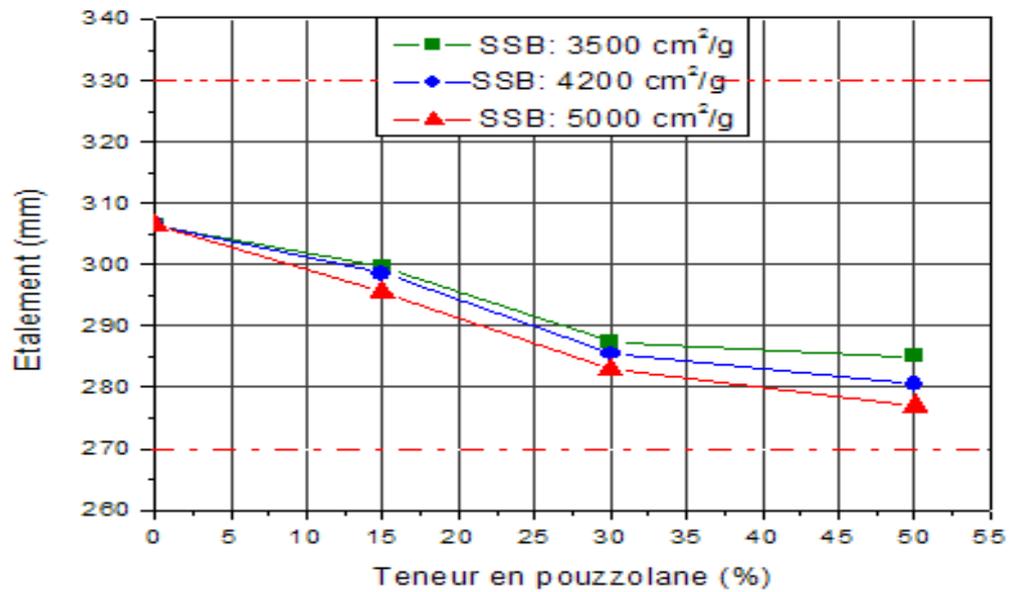


Figure 4.3: Variation de l'étalement du mortier à base de pouzzolane.

A partir de cette figure, on remarque que les valeurs d'étalement diminuent avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane ; cette variation est notée pour les trois finesses différentes. A titre d'exemple, pour une finesse de 3500 cm<sup>2</sup>/g, les valeurs d'étalement des mortiers élaborés avec 15, 30 et 50 % de pouzzolane représentent respectivement 97,7 ; 93,8 et 92,9% de celui du mortier contrôle. Il est clair aussi que la finesse de la pouzzolane influe légèrement l'ouvrabilité. En effet, on observe que l'étalement de la galette diminue avec l'augmentation de la finesse. Pour un taux de substitution de 50% par exemple, l'étalement des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle d'une finesse 4200 et 5000 cm<sup>2</sup>/g a subi une diminution de 1,6 et 2,8% respectivement comparé avec celui contenant de la pouzzolane broyée à 3500 cm<sup>2</sup>/g. 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 (Figure 4.4).



Figure 4.4 : Aspect du mortier autoplaçant à base de pouzzolane.

#### 4.3.2. Essai d'écoulement au V-Funnel

La figure 4.5 montre l'influence de la pouzzolane sur le temps d'écoulement au V-Funnel. Selon DOMONE et Jin [71], un bon mortier autoplaçant devrait présenter un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 s. En analysant les résultats représentés sur la figure 4.5, on remarque que l'accroissement de la teneur en pouzzolane (pour une finesse de 3500 et 4200  $\text{cm}^2/\text{g}$ ) de 0 à 15% engendre une diminution du temps d'écoulement au V- Funnel. Lorsque le taux de substitution dépasse les 15%, le temps d'écoulement augmente proportionnellement aux taux de substitution jusqu'à ce qu'il dépasse la limite supérieur de l'intervalle proposé par les chercheurs [71] pour une teneur de 50% de pouzzolane. Dans le cas d'une finesse de 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$ , le temps d'écoulement augmente avec l'accroissement de la teneur en pouzzolane. En effet, une augmentation de 19,8% ; 30,1% et 127 % est notée pour les mortiers élaborés avec 15, 30 et 50% de pouzzolane respectivement comparé à celle du mortier témoin. 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 50%, les mortiers élaborés avec de la pouzzolane naturelle broyée à une finesse de 4200 et 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$  présentent une augmentation de 27,7 et 32,7% respectivement de celle du mortier confectionné avec de la pouzzolane d'une finesse de 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

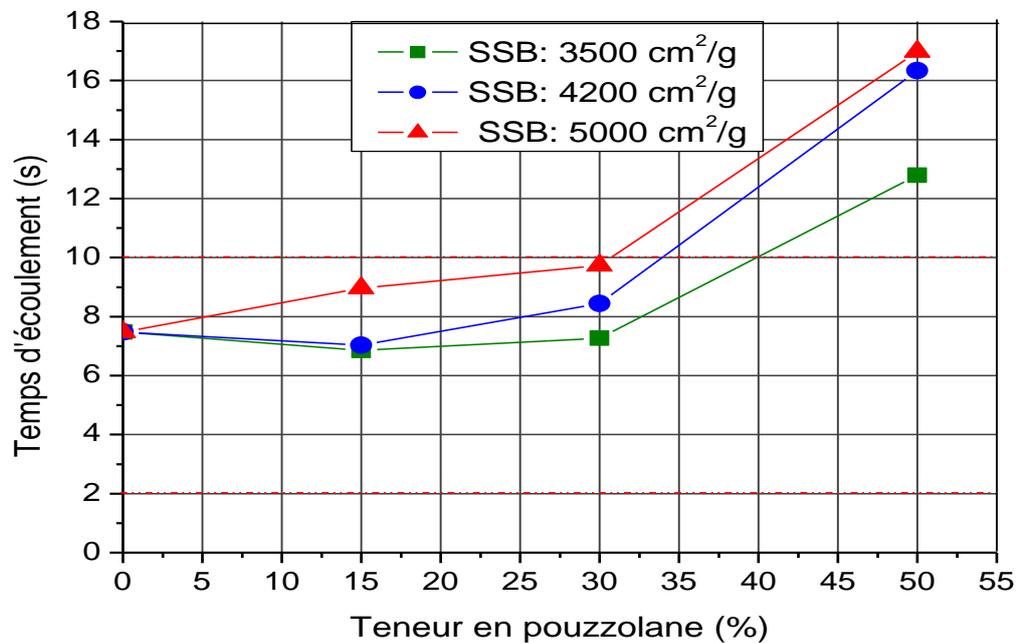


Figure 4.5: Variation du temps d'écoulement du mortier à base de pouzzolane.

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. [72]. 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. [73]. 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 [74] 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.

Cependant, certains auteurs ont rapporté que la pouzzolane améliore l'ouvrabilité et la plasticité des bétons [75]. BELHACHEMI [76] a montré que l'eau de gâchage nécessaire pour une consistance normale augmente avec l'accroissement de la finesse de la pouzzolane.

#### 4.4. Influence du laitier sur l'ouvrabilité des MAP

Le laitier est introduit par substitution au ciment à trois teneurs et à trois finesses différentes. L'influence de ces paramètres sur l'ouvrabilité des MAP est étudiée. Il est important dans cette étape d'obtenir un mortier homogène ne présentant pas de ressuage. Les résultats des essais d'ouvrabilité obtenus sont rassemblés dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6: Résultats d'essais à l'état frais d'un mortier à base de laitier

Teneur (%)	Finesse du laitier, SSB ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )					
	3500		4200		5000	
	Etalement (mm)	Temps (s) V-Funnel	Etalement (mm)	Temps (s) V-Funnel	Etalement (mm)	Temps (s) V-Funnel
0	306,5	7,48	306,5	7,48	306,5	7,48
15	309,5	7,28	313,0	6,88	319,0	5,90
30	312,0	9,93	320,5	7,04	324,0	5,43
50	327,5	11,0	335,0	7,84	339,5	4,90

##### 4.4.1. Essai d'étalement au mini-cône

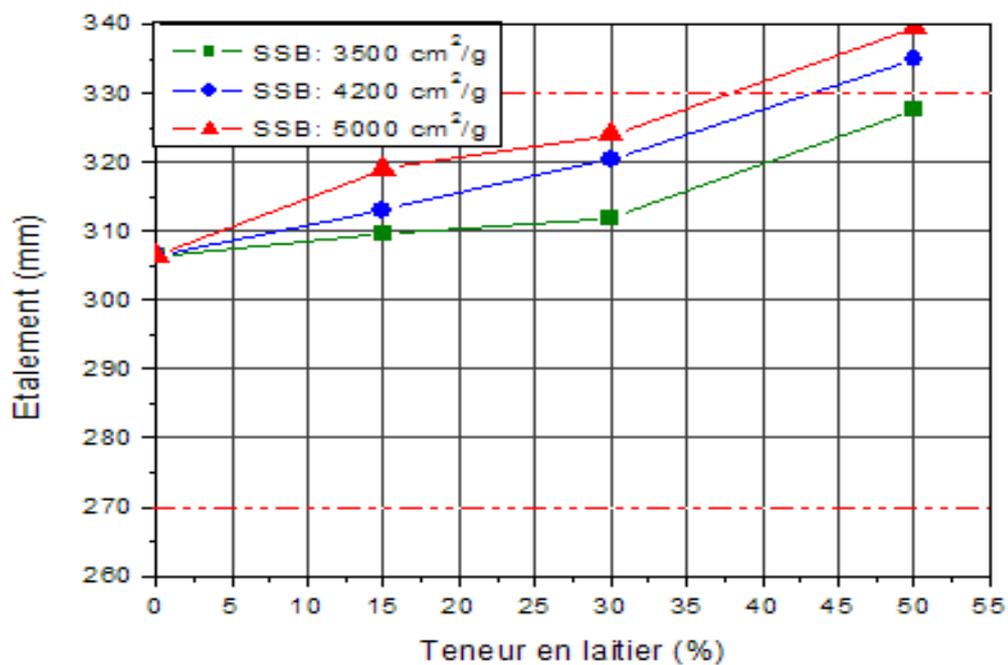


Figure 4.6: Variation de l'étalement du mortier à base de laitier.

Selon la figure 4.6, nous pouvons constater que l'augmentation de la teneur en laitier améliore l'étalement du mortier. Cette observation est notée quelque soit la finesse de l'ajout. Pour une finesse de  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$  par exemple, l'étalement moyen des mortiers confectionnés avec 15%, 30% et 50% augmente de 1% ; 1,8% et 6,8% respectivement comparé avec celui du mortier témoin. Cependant, nous avons remarqué l'apparition d'eau de ressuage dans les galettes de mortiers formulés avec 50 % de laitier (Figure 4.7). Cette observation est notée pour les trois différentes finesses de mouture du laitier. Par ailleurs, les résultats montrent aussi que l'étalement du mortier augmente avec l'augmentation de la surface spécifique du laitier. En effet, pour une teneur de 50% d'addition, l'étalement moyen des mortiers réalisés avec du laitier de finesses  $4200$  et  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$  présente une augmentation d'environ 2% et 4% par rapport à l'étalement du mortier élaboré avec du laitier d'une finesse de  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

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 des surfaces 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 [77]. Par ailleurs, l'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.



Figure 4.7: Aspect du mortier autoplaçant à base de laitier.

#### 4.4.2. Essai d'écoulement au V-Funnel

La figure 4.8 montre l'influence de la teneur en laitier ainsi que l'effet de sa finesse sur la variation du temps d'écoulement au V-Funnel des mortiers autoplaçants étudiés.

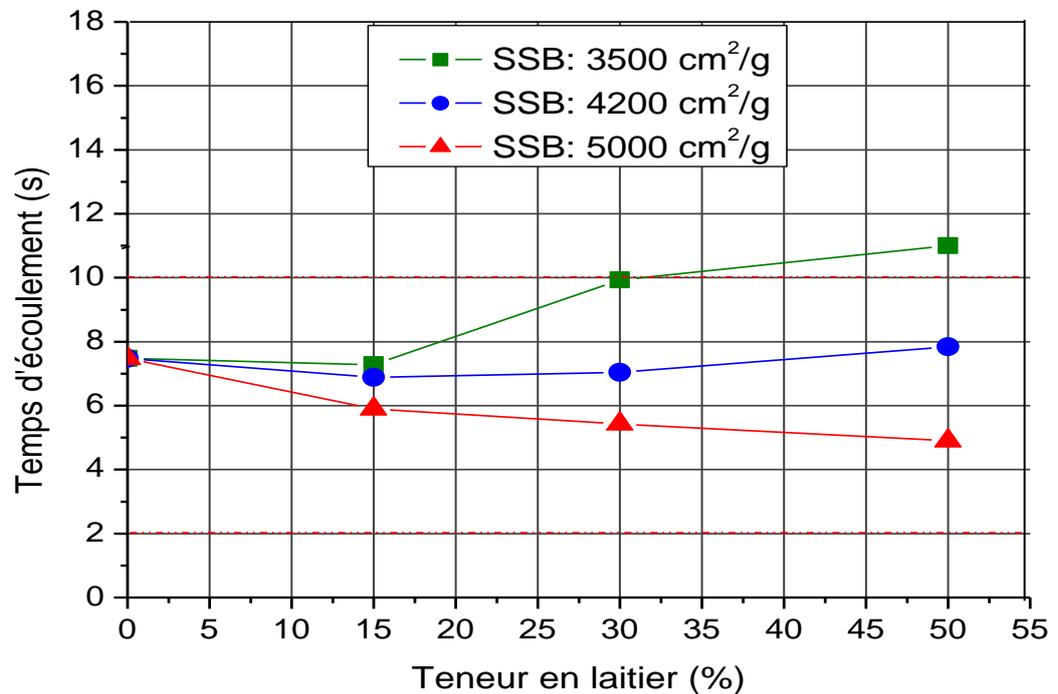


Figure 4.8: Variation du temps d'écoulement du mortier à base de laitier.

On remarque que la variation de la teneur en laitier influe considérablement l'ouvrabilité (temps d'écoulement) des MAP. En effet, l'introduction de cette addition en raison de 15% dans les compositions étudiées fait diminuer le temps d'écoulement de 2,7% ; 8,2% et 21,1% pour les trois finesses d'addition 3500, 4200 et 5000 cm<sup>2</sup>/g respectivement comparé avec celui du mortier de référence (0 % d'ajouts). Lorsque le pourcentage du laitier dépasse les 15 %, le temps d'écoulement augmente proportionnellement à sa teneur. Ceci est observé pour les finesses de 3500 cm<sup>2</sup>/g et 4200 cm<sup>2</sup>/g. Cependant, pour une finesse de 5000 cm<sup>2</sup>/g, on remarque que le temps d'écoulement diminue avec l'augmentation du taux de substitution. Par ailleurs, on constate que le temps d'écoulement au V-Funnel diminue avec l'augmentation de la finesse. A titre d'exemple, pour une teneur de 50% de laitier, une réduction du temps d'écoulement de 28,7 et 55,5% est notée pour les mortiers

formulés avec du laitier broyé à une finesse de 4200 et 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$  respectivement comparé avec celui d'une finesse de 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

BOUKENDAKDJI [70], a montré que l'augmentation du pourcentage du laitier dans le béton autoplaçant engendre une amélioration de l'ouvrabilité du point de vue étalement pour une substitution du ciment allant de 0% à 25%. Par ailleurs, l'auteur a montré que l'incorporation du laitier dans le béton à raison de 15% donne le plus bas temps d'écoulement au V-Funnel.

LI et DING [78] ont étudié l'effet du laitier sur l'ouvrabilité des mortiers. Leurs résultats ont montré que l'incorporation du laitier de 20% à 30% dans le mortier améliore sa fluidité.

D'autre part, SHI et al. [79] ont montré en étudiant l'influence du laitier sur l'ouvrabilité des mortiers que l'étalement de la galette augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier (pour des taux de substitution allant jusqu'à 50% de laitier). Par ailleurs, il a été montré que l'augmentation de la surface spécifique du laitier engendre une demande d'eau plus importante lors de la fabrication du liant [75].

#### 4.5. Essais à l'état durci

Au cours des essais d'ouvrabilité, nous avons remarqué qu'un taux de substitution de 50% de laitier conduit à l'obtention d'un mortier autoplaçant non homogène (apparition d'eau de ressuage). D'autre part, les mortiers confectionnés avec 50% de pouzzolane ont donné un temps d'écoulement au V-Funnel plus élevé que la limite supérieure proposée par DOMONE et al. [71]. Pour cela, nous avons jugé utile de continuer notre étude avec seulement les deux pourcentages de substitution (15 et 30%) que ce soit pour le laitier ou la pouzzolane.

##### 4.5.1. Résistance à la compression

Pour chaque type de mortier, les mesures ont été réalisées sur trois éprouvettes prismatiques de dimensions  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ , la moyenne des trois valeurs est retenue. Les résultats de l'essai de résistance effectué sur les différents mortiers à base de laitier et de pouzzolane (à différentes teneurs de substitution et à différentes finesse) aux échéances 3, 7, 28 et 56 jours sont présentés dans cette partie.

#### 4.5.1.1. Influence de la pouzzolane naturelle

Les valeurs de résistance en compression moyennes sont récapitulées dans le tableau 4.7.

Tableau 4.7 : Résultats de l'essai de résistance des mortiers à base de pouzzolane

		Finesse de la pouzzolane, SSB (cm <sup>2</sup> /g)								
		3500			4200			5000		
Age (jours)	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la compression (MPa)			
	Teneur en pouzzolane			Teneur en pouzzolane			Teneur en pouzzolane			
	0%	15%	30%	0%	15%	30%	0%	15%	30%	
3	37,2	31,5	24,2	37,2	33,3	25,5	37,2	33,9	28,5	
7	58,0	50,1	40,5	58,0	51,4	42,6	58,0	51,4	44,4	
28	70,4	63,6	59,0	70,4	66,2	63,0	70,4	67,1	64,2	
56	75,0	66,0	63,9	75,0	69,6	66,7	75,0	69,7	67,4	

L'influence de la teneur et de la finesse de la pouzzolane sur l'évolution des résistances mécaniques à court et à moyen terme est montrée sur les figures présentées ci-après.

#### • Influence de la teneur

Les figures 4.9, 4.10 et 4.11 présentent l'évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant différentes substitutions de la pouzzolane naturelle. D'après ces figures, on constate que les mortiers formulés à base de pouzzolane développent des résistances qui restent toujours inférieures à celle du mortier témoin et cela à tous les âges. Cette observation est notée pour toutes les finesses étudiées. De plus, une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane dans le mortier est observée à toutes les échéances. A 56 d'âge, elle est de l'ordre de 88% et 85 % pour les mortiers contenant 15% et 30% de pouzzolane respectivement par rapport au mortier contrôle (pour une finesse de 3500 cm<sup>2</sup>/g). Ces figures montrent également que l'écart de résistance entre les mortiers contenant 15 et 30% de pouzzolane est moins important à l'âge de 28 et 56 jours comparé à celui obtenu à 3 et 7 jours. En effet, à titre d'exemple, pour une finesse de 3500 cm<sup>2</sup>/g, les résistances des échantillons élaborés avec 30%

de pouzzolane représentent 77% et 81% de celles des mortiers contenant 15% d'addition à 3 et 7 jours respectivement. Aux âges 28 et 56 jours, les résistances de ces derniers (30% de pouzzolane) atteignent 93% et 97% de celle du mortier à 15% d'addition. En ce qui concerne les autres finesses (4200  $\text{cm}^2/\text{g}$  et 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$ ), nous avons également constaté que les résistances des échantillons élaborés avec 15 et 30% de pouzzolane naturelle sont similaires aux échéances 28 et 56 jours.

L'écart de résistance qui est plus au moins important à court terme (3 et 7 jours) est peut être du à l'activité pouzzolanique de la pouzzolane naturelle qui est lente à cet âge de conservation. Ce phénomène s'explique par la réaction en présence d'eau de la silice amorphe ( $\text{SiO}_2$ ) présente dans la pouzzolane naturelle avec la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$  produite par l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H) supplémentaires. Par ailleurs, l'amélioration des résistances en compression à 28 et 56 jours peut être attribuée à l'augmentation des hydrates (C-S-H) grâce à la l'activité de la pouzzolane naturelle qui se manifeste avec toute son ampleur sur les longues échéances conduisant ainsi à une hydratation plus intense et par conséquent de meilleures résistances.

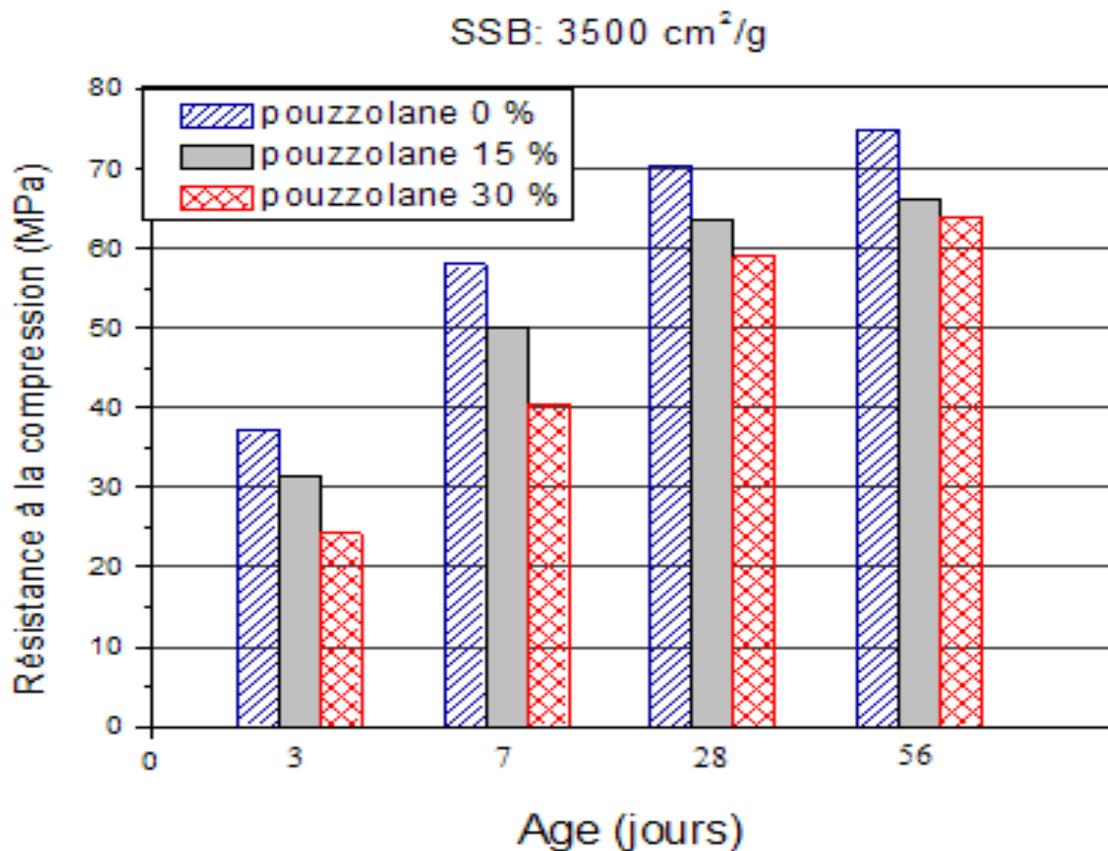


Figure 4.9: Variation de la résistance en compression des MAP (SSB : 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$ ).

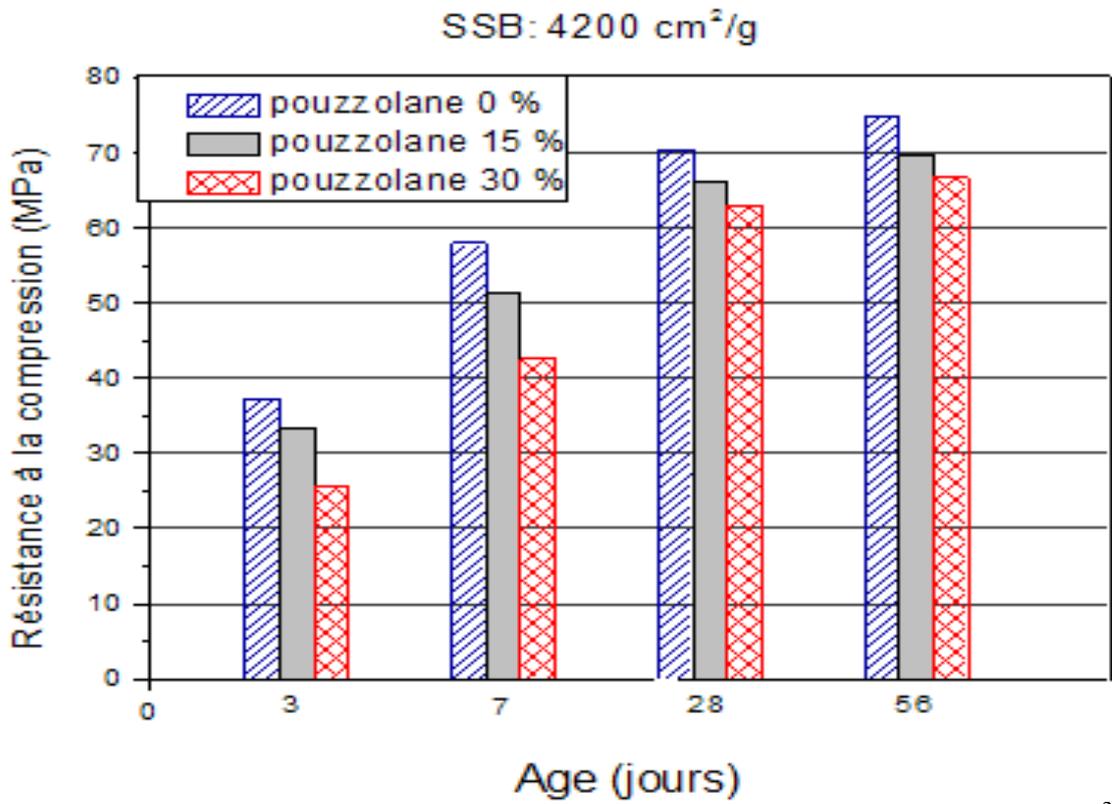


Figure 4.10: Variation de la résistance en compression des MAP (SSB : 4200 cm<sup>2</sup>/g).

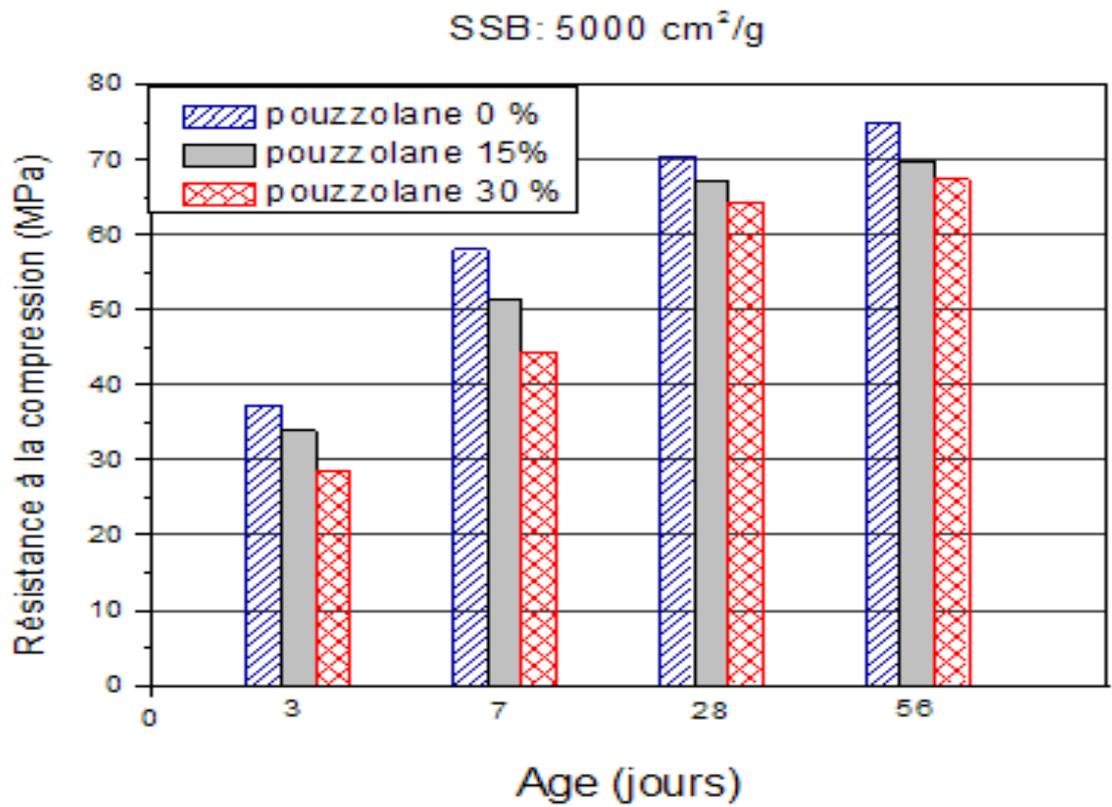


Figure 4.11: Variation de la résistance en compression des MAP (SSB : 5000 cm<sup>2</sup>/g).

BENKADDOUR et al. [80] dans leur étude ont trouvé que la résistance en compression diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage de la pouzzolane à jeune et à moyen terme (2, 7 et 28 jours). A titre d'exemple, ils ont remarqué qu'une substitution de 30% de pouzzolane naturelle engendre une diminution de la résistance en compression de 36,7% ; 6,2% et 24,5% à 2, 7 et 28 jours respectivement. D'autre part, MANSOUR [81] a montré qu'un taux de substitution de 30% de pouzzolane engendre une diminution de 15% de la résistance à la compression des bétons à long terme (90 jours). Ces résultats sont similaires avec ceux obtenus par TARGAN et al. [82] qui ont trouvé une diminution de 11% de la résistance à la compression à l'échéance de 90 jours. Cependant, il a été affirmé que l'utilisation de la pouzzolane naturelle entraîne un accroissement de la résistance finale des bétons [75].

- **Influence de la finesse**

Les figures 4.12 et 4.13 montrent le développement de la résistance en compression des mortiers élaborés avec 15 et 30 % de pouzzolane en fonction de la finesse de l'ajout aux différentes échéances. D'après ces courbes, nous pouvons constater que l'augmentation de la surface spécifique de l'ajout a un effet positif sur la résistance à la compression aux différents âges. En effet, on remarque une amélioration de la résistance à la compression avec l'augmentation de la finesse de l'ajout. Cet effet est noté quelque soit le taux de substitution de la pouzzolane (15 et 30%). Pour un remplacement de 30% par exemple, l'augmentation de résistance à l'âge de 56 jours est de l'ordre de 2,8 MPa pour une finesse de 4200 cm<sup>2</sup>/g et de 3,5 MPa pour une finesse de 5000 cm<sup>2</sup>/g comparé avec celle du mortier à base de pouzzolane d'une finesse de 3500 cm<sup>2</sup>/g. L'accroissement de la résistance en compression est probablement dû à une hydratation rapide et complète générée par l'augmentation de la surface spécifique de la pouzzolane. En effet, plus la pouzzolane est fine, plus sa réaction avec la chaux est rapide conduisant ainsi à des résistances en compression plus élevées. KHAN et al. [83] ont montré que l'augmentation de la finesse de la pouzzolane naturelle (de 1800 cm<sup>2</sup>/g à 3400 cm<sup>2</sup>/g) n'a pas un effet significatif sur l'évolution de la résistance en compression (jusqu'à 200 jours d'âge).

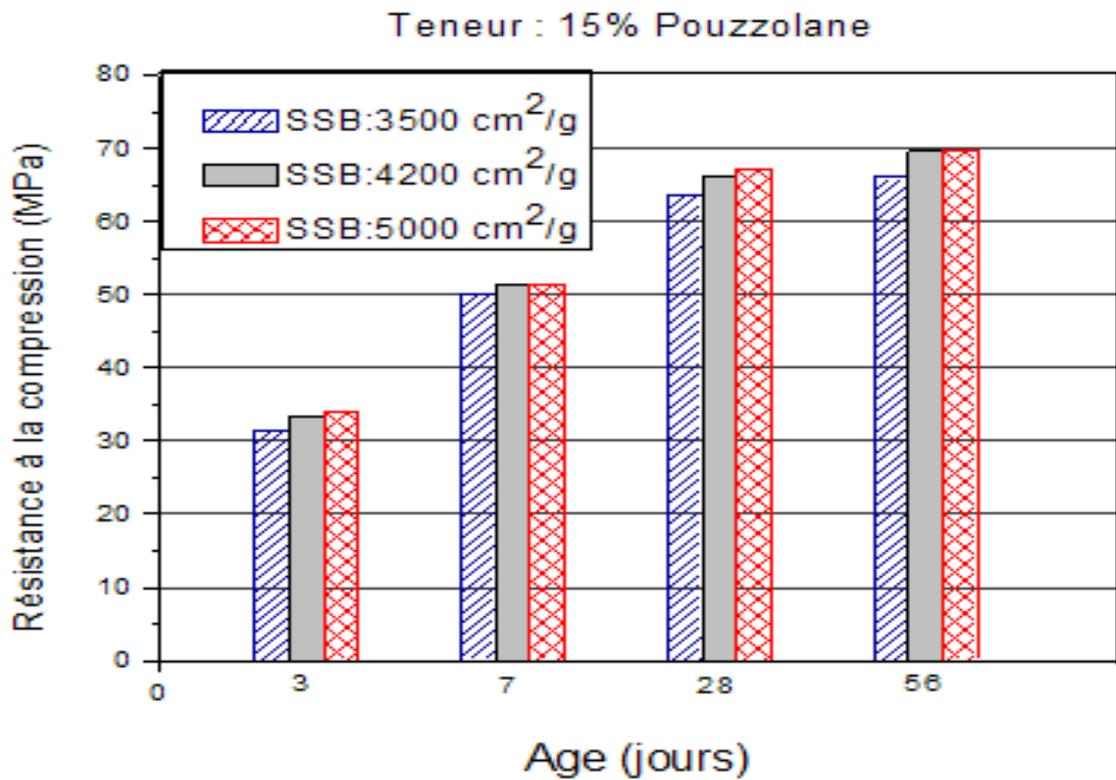


Figure 4.12: Variation de la résistance en compression en fonction du temps des mortiers à base de 15% de pouzzolane.

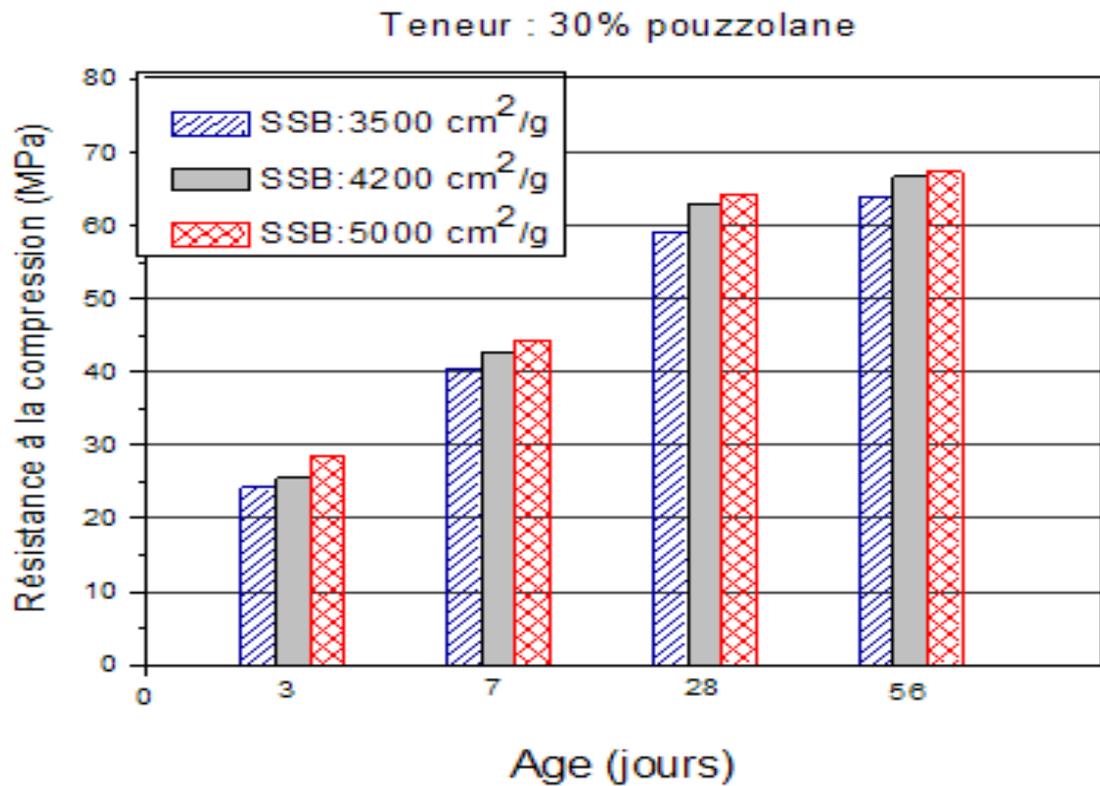


Figure 4.13: Variation de la résistance en compression en fonction du temps des mortiers à base de 30% de pouzzolane.

#### 4.5.1.2. Influence du laitier

Le tableau 4.8 résume les valeurs moyennes des résistances mécaniques en compression.

Tableau 4.8 : Résultats de l'essai de résistance des mortiers à base de laitier

		Finesse du laitier, SSB (cm <sup>2</sup> /g)								
		3500			4200			5000		
Age (jours)	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la compression (MPa)			
	Teneur en laitier			Teneur en laitier			Teneur en laitier			
	0%	15%	30%	0%	15%	30%	0%	15%	30%	
3	37,2	35,3	27,6	37,2	32,3	24,6	37,2	29,9	24,1	
7	58,0	54,7	44,7	58,0	52,4	43,2	58,0	52,0	41,8	
28	70,4	68,8	65,5	70,4	67,6	64,9	70,4	66,0	61,2	
56	75,0	72,8	69,9	75,0	71,7	68,2	75,0	69,1	65,9	

Les figures suivantes montrent l'effet de substitution du ciment par le laitier ainsi que l'influence de sa finesse sur l'évolution des résistances mécaniques à la compression.

#### • Influence de la teneur

Les figures 4.14, 4.15 et 4.16 illustrent l'influence du laitier de hauts fourneaux sur la résistance à la compression des mortiers autoplaçants à différentes échéances. D'après ces figures, on peut remarquer que l'augmentation de la teneur en laitier engendre une diminution de la résistance à la compression quelque soit l'âge des mortiers. Ceci est peut être dû à la réactivité des laitiers qui diminue lorsque la teneur en laitier augmente [84] conduisant ainsi à une réduction de la résistance en compression. Cette observation est notée pour les trois finesses de l'ajout (3500, 4200 et 5000 cm<sup>2</sup>/g). En effet, dans le cas des mortiers élaborés avec du laitier broyé à 3500 cm<sup>2</sup>/g, nous avons obtenu des résistances de 95% et 74% à l'âge de 3 jours et de 94% et 77% à l'âge de 7 jours par rapport à celle du mortier contrôle pour des dosages en pouzzolane de 15 et 30% respectivement.

A moyen terme, on remarque que les résistances des mortiers contenant 15% et 30% de laitier sont comparables à celle du mortier de référence. Des résistances de l'ordre de 98% et 93% à l'âge de 28 jours et de 97% et 93% à l'âge de 56 jours ont été observées par rapport à la résistance de référence. Ces figures montrent également que l'écart de résistances entre les mortiers élaborés avec 15% et 30% est moins important à l'âge de 28 et 56 jours. Ceci peut être expliqué par la réaction d'hydratation du laitier qui est lente à jeune âge (2 et 7 jours). Cependant, l'accroissement de la résistance à partir de l'âge de 28 jours peut être attribué à la réactivité des laitiers qui se déclenche à partir de cette échéance conduisant ainsi à l'amélioration de la microstructure par la formation de produits d'hydratation additionnels [85].

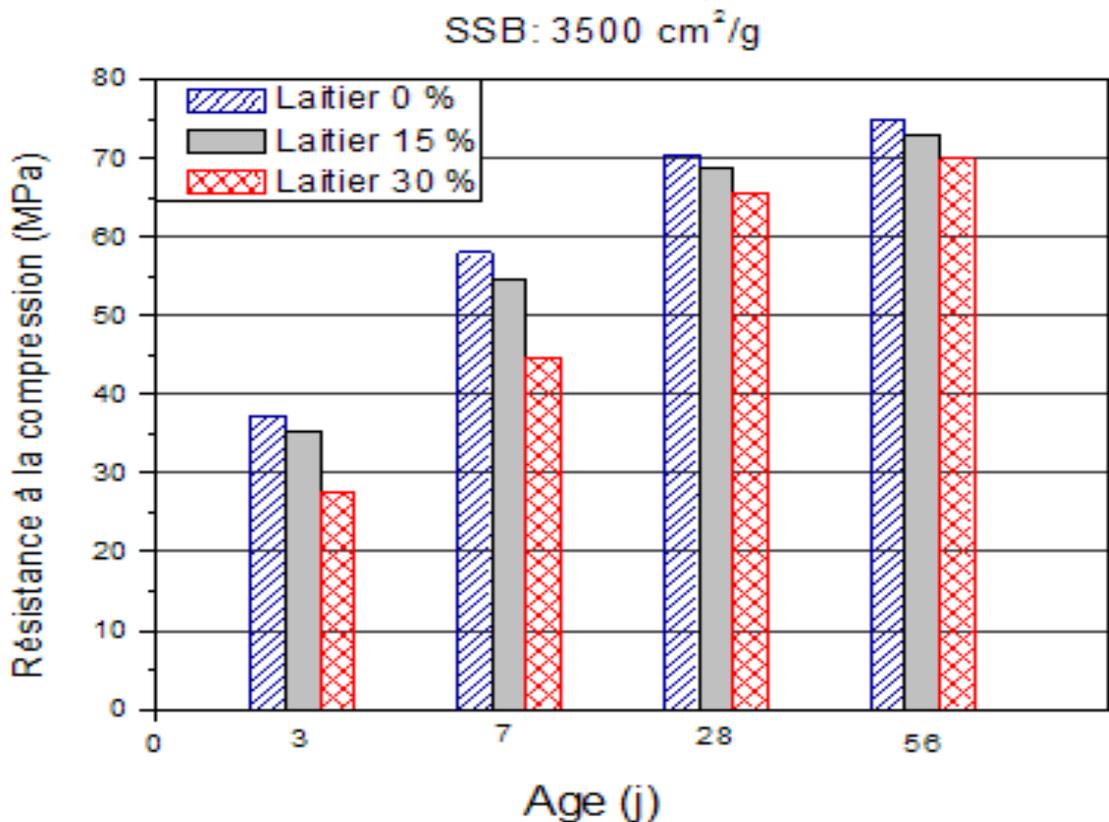


Figure 4.14: Variation de la résistance en compression des MAP (SSB : 3500 cm<sup>2</sup>/g).

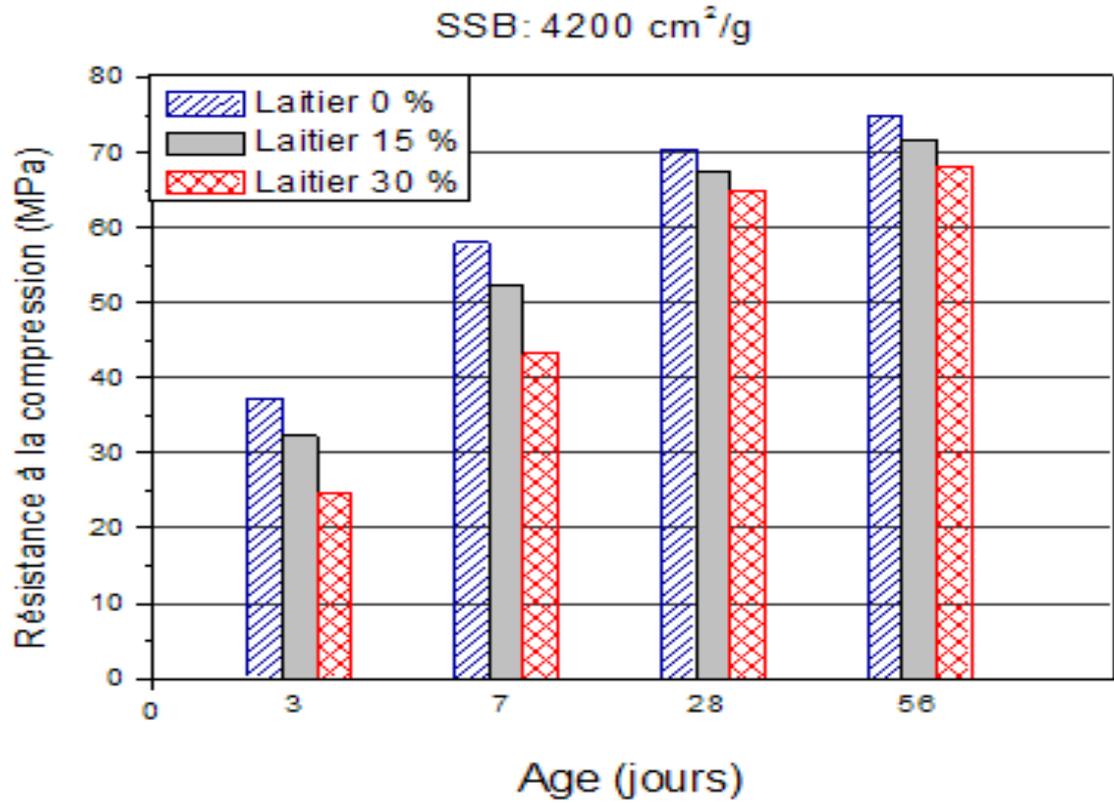


Figure 4.15: Variation de la résistance en compression des MAP (SSB : 4200 cm<sup>2</sup>/g).

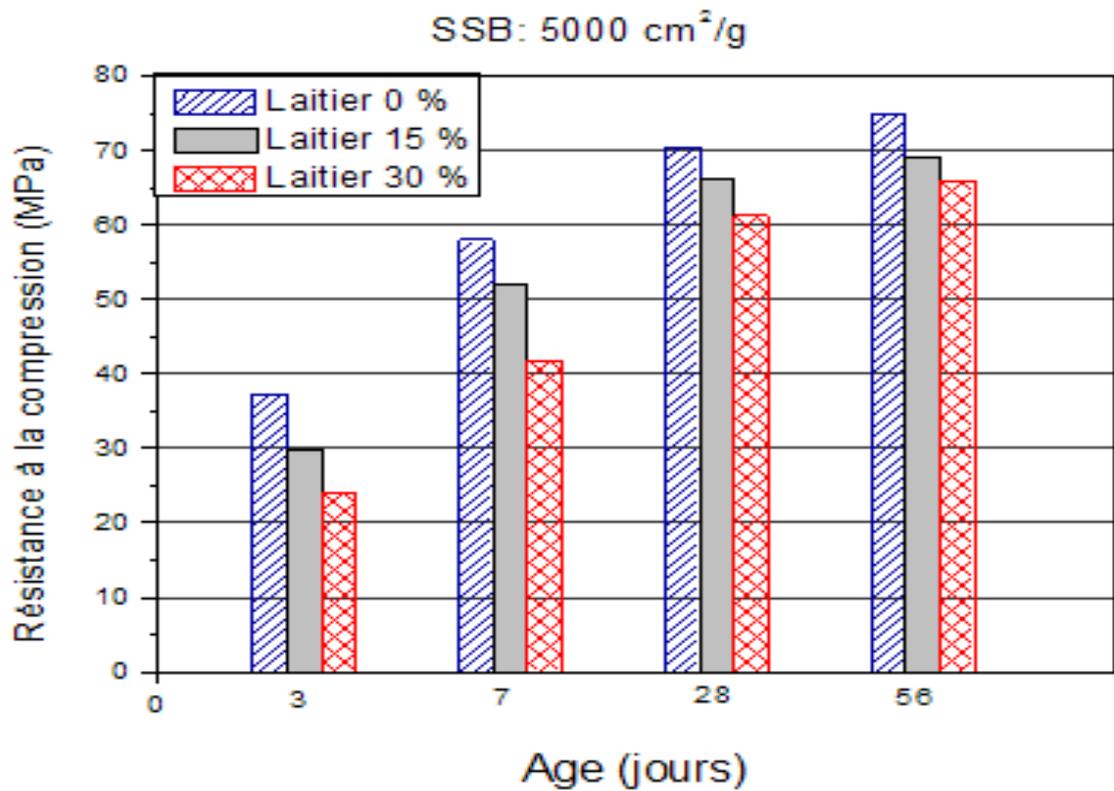


Figure 4.16: Variation de la résistance en compression des MAP (SSB : 5000 cm<sup>2</sup>/g).

Nos résultats sont conformes à ceux obtenus par BOUKENDAKDJI [70]. En effet, l'auteur a montré que l'augmentation de la teneur en laitier dans les mélanges de bétons génère une diminution de la résistance en compression à toutes les échéances (7, 28, 56 et 90 jours). Par ailleurs, KOUROUNIS et al. [86] ont également observé des chutes de résistances avec l'accroissement de la quantité du laitier présente dans le mortier. Dans leur étude sur l'activité du laitier d'El Hadjar, BOUGARA et al. [87] ont montré que l'utilisation du laitier engendre une détérioration des résistances mécaniques à jeune âge. Ceci a été expliqué par la lente réactivité du laitier. D'autre part, ONER et AKYUZ [88] ont observé que l'augmentation du pourcentage de laitier dans les mélanges de bétons induit une augmentation des résistances à la compression.

- **Influence de la finesse**

Les figures 4.17 et 4.18 illustrent l'effet de la finesse du laitier sur la résistance à la compression des mortiers autoplaçants aux différents âges : 3, 7, 28 et 56 jours. D'après ces figures, on observe une légère réduction des résistances des mortiers à tous les âges au fur et à mesure que la finesse du laitier augmente. Cette observation est notée pour les deux taux de substitution au ciment (15 et 30% de laitier).

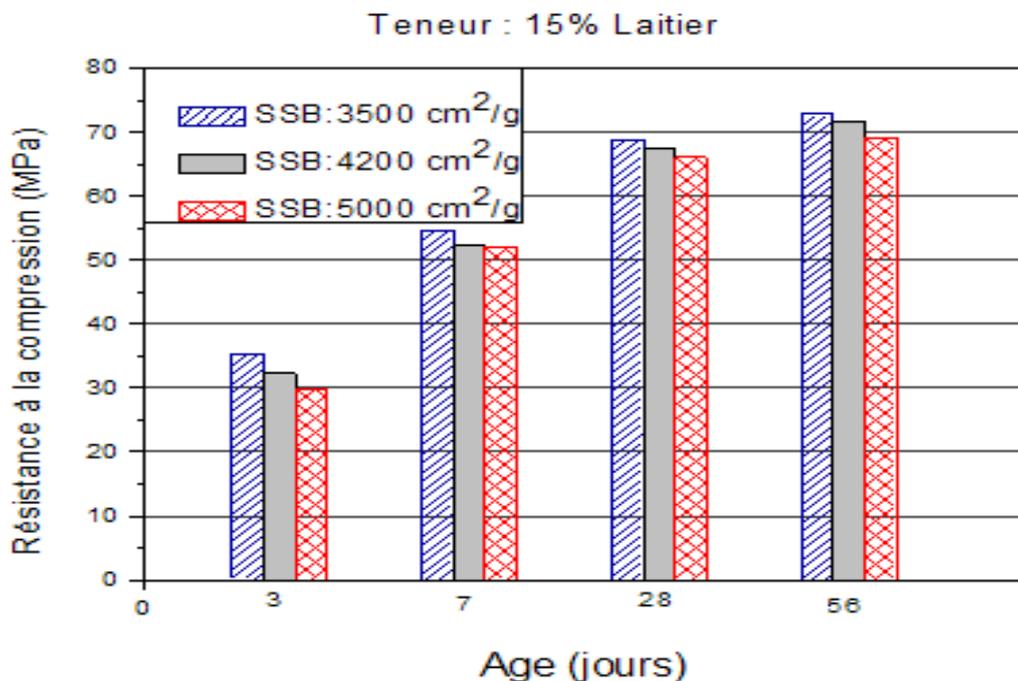


Figure 4.17: Variation de la résistance en compression en fonction du temps des mortiers à base de 15% de laitier.

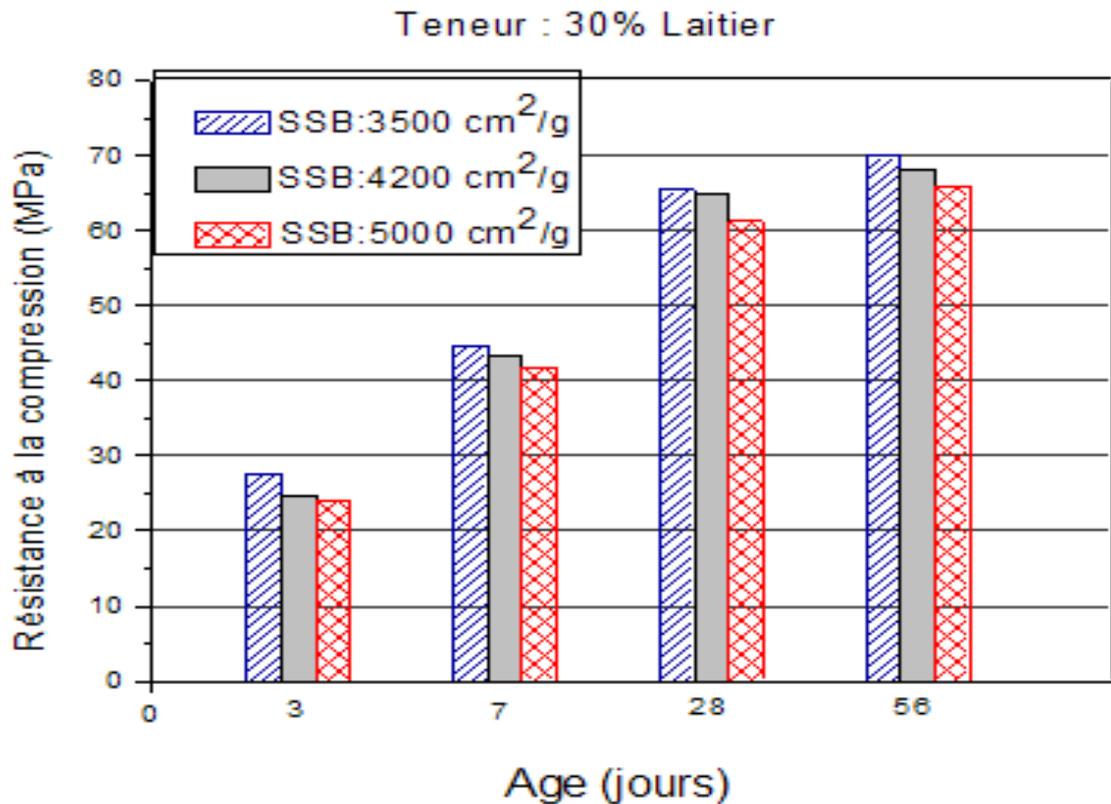


Figure 4.18: Variation de la résistance en compression en fonction du temps des mortiers à base de 30% de laitier.

BOUGARA et al. [87] ont observé que l'augmentation de la surface spécifique du laitier de 360 à 420 m<sup>2</sup>/kg n'augmentera pas significativement la résistance à la compression. Par conséquent, ils ont conclu qu'il n'y a aucun intérêt à broyer le laitier au-delà de 360 m<sup>2</sup>/kg. Cependant, NACERI [89] a montré que l'augmentation de la surface spécifique du laitier de 2000 cm<sup>2</sup>/g à 4800 cm<sup>2</sup>/g engendre une augmentation de la résistance mécanique.

#### 4.5.2. Mesure du retrait (total)

Le retrait total cumule, le retrait endogène qui est associé aux réactions d'hydratation et le retrait de dessiccation qui est lié à l'évaporation d'eau à travers les pores de la pâte de ciment. Les mesures de retrait exposées dans cette partie ont été effectuées sur trois éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm<sup>3</sup> à compter du 1<sup>er</sup> jour après mise en œuvre du mortier jusqu'à l'âge de 28 jours. Les éprouvettes de retrait sont en contact avec l'extérieur et tout échange hydrique avec ce milieu est permis. Les résultats du retrait total des éprouvettes de mortier fabriquées avec 0, 15 et 30% de laitier et de pouzzolane broyées à des finesses différentes sont examinés ci-après.

#### 4.5.2.1. Influence de la pouzzolane sur le retrait total

Les résultats du retrait des mortiers autoplaçants à base de pouzzolane, avec les différentes finesses sont résumés dans le tableau 4.9 et présentés dans les figures 4.19 à 4.21.

Tableau 4.9 : Retrait des mortiers autoplaçants à base de pouzzolane

Age (jours)	Finesse de pouzzolane, SSB (cm <sup>2</sup> /g)								
	3500			4200			5000		
	Retrait total (µm/m)			Retrait total (µm/m)			Retrait total (µm/m)		
	0%	15%	30%	0%	15%	30%	0%	15%	30%
1	66	42	53	66	43	37	66	58	80
2	73	58	72	73	61	74	73	73	94
3	92	87	79	92	92	89	92	108	115
4	108	104	87	108	159	115	108	168	129
6	142	139	104	142	219	134	142	231	180
7	162	161	120	162	219	160	162	237	185
8	186	179	137	186	220	163	186	253	210
9	210	208	151	210	257	186	210	278	249
13	315	253	184	315	294	224	315	321	280
16	354	280	213	354	311	250	354	339	308
22	401	310	264	401	371	282	401	380	353
23	402	326	270	402	378	291	402	384	357
26	420	340	286	420	392	339	420	392	381
28	438	357	294	438	396	352	438	394	388

### • Influence du taux de la pouzzolane

Les figures 4.19, 4.20 et 4.21 illustrent l'évolution moyenne du retrait total en fonction du temps des mortiers contenant 0, 15 et 30% de pouzzolane naturelle de surfaces spécifiques différentes. Sur la figure 4.19, on constate que l'introduction de 15% de pouzzolane broyée à  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$  n'a pas un effet significatif sur le retrait jusqu'à l'âge de 9 jours comparé avec le mortier témoin. Après le neuvième jour, le mortier à 15% de pouzzolane développe un retrait moins important que celui du mortier de référence. A 28 jours d'âge, l'écart de retrait est de  $81 \text{ }\mu\text{m}/\text{m}$  entre les mortiers contenant 0 et 15% de pouzzolane naturelle. L'analyse de ces courbes montre également que les mortiers à base de 30% de pouzzolane naturelle sont caractérisés par un retrait total inférieur à celui des échantillons à des taux de substitution de 0 et 15%. Du point de vue quantitatif, la différence du retrait total est de  $144 \text{ }\mu\text{m}/\text{m}$  par rapport au mortier témoin et de  $63 \text{ }\mu\text{m}/\text{m}$  par rapport au mortier à 15% de pouzzolane à l'échéance de 28 jours.

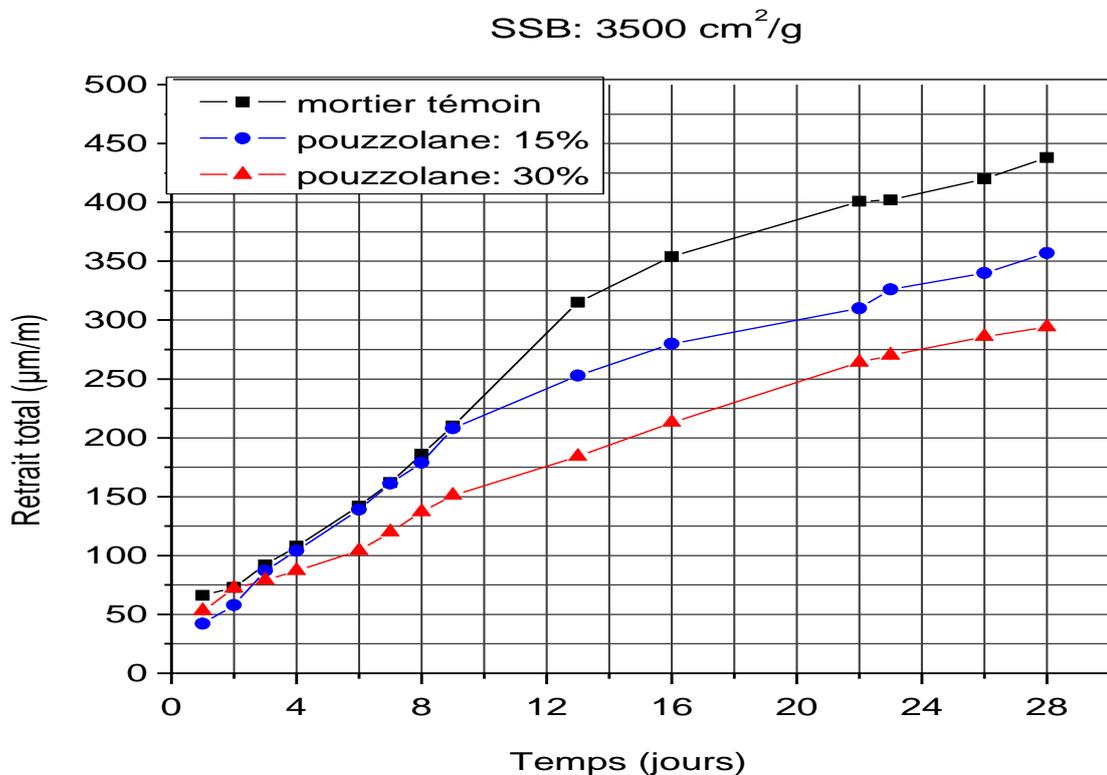


Figure 4.19: Evolution du retrait total des MAP à base de pouzzolane (SSB:  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ ).

D'après la figure 4.20, on remarque qu'à jeune âge, le retrait de l'échantillon à 15% de pouzzolane dépasse celui du mortier témoin. L'augmentation est de  $57 \mu\text{m/m}$  à l'âge de 7 jours. Tandis que celui à 30% présente une légère infériorité. Après la première semaine, on constate que le retrait diminue avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane. En effet, à 28 jours d'âge, la diminution est de  $42 \mu\text{m/m}$  et de  $86 \mu\text{m/m}$  pour les mortiers contenant 15 et 30% de pouzzolane respectivement comparé avec le mortier contrôle.

Sur la figure 4.21, on observe que la substitution du ciment par la pouzzolane naturelle broyée à une finesse de  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$  engendre, à courte échéance, un retrait supérieur à celui du mortier témoin. Au septième jour, l'augmentation est de l'ordre de  $75 \mu\text{m/m}$  et  $23 \mu\text{m/m}$  pour les mortiers à 15 et 30% de pouzzolane respectivement par rapport au mortier à 0% de pouzzolane. Après le dixième jour, on observe une légère infériorité du retrait des échantillons à la pouzzolane naturelle. En effet, A l'âge de 28 jours, une réduction de  $44$  et  $50 \mu\text{m/m}$  est notée pour les éprouvettes à 15 et 30% de pouzzolane respectivement.

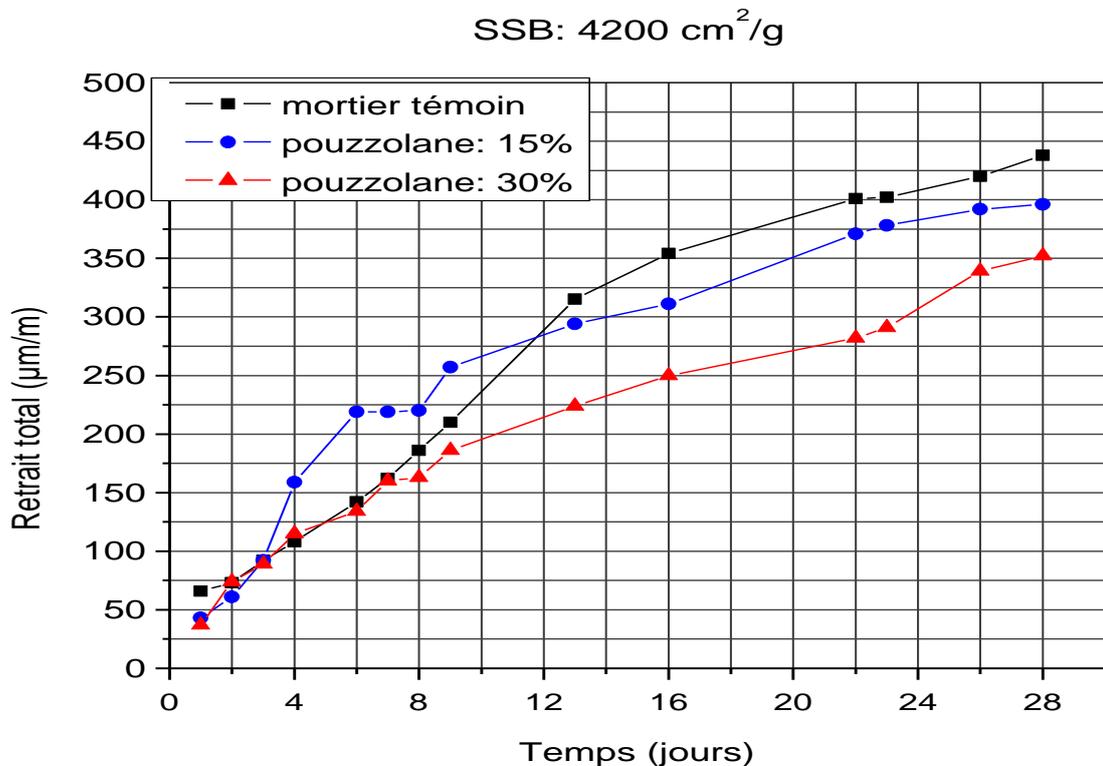


Figure 4.20: Evolution du retrait total des MAP à base de pouzzolane (SSB:  $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$ ).

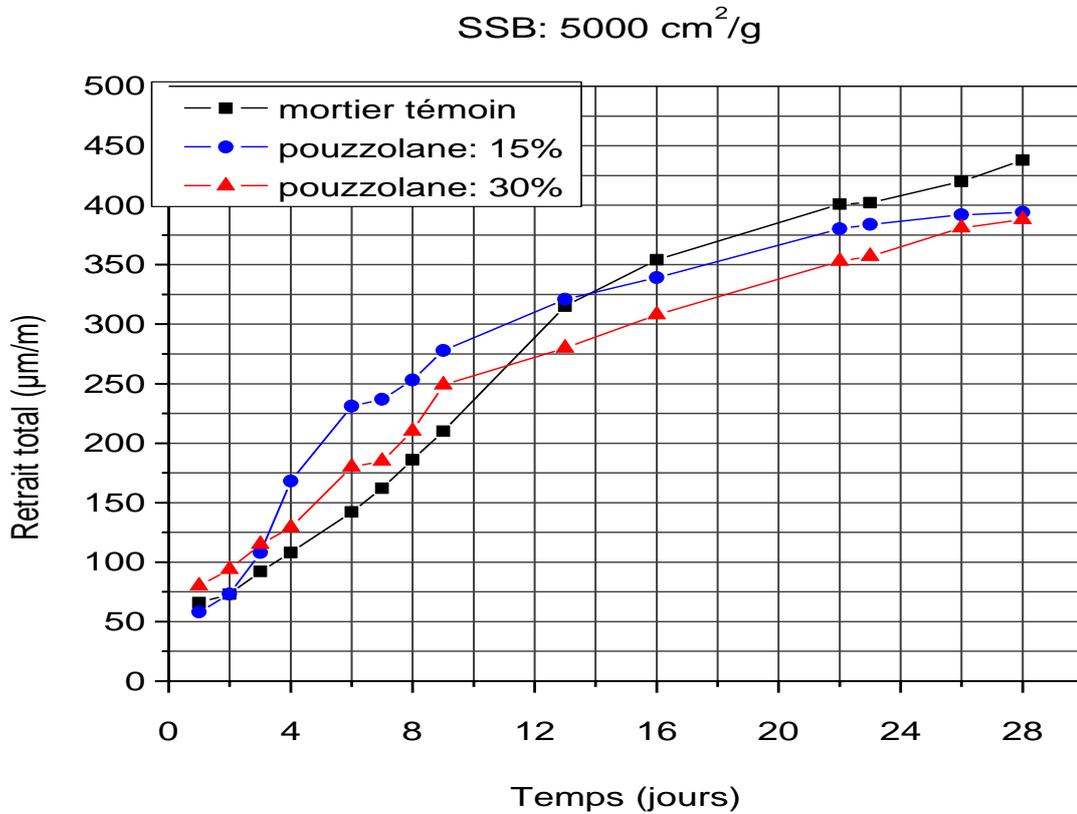


Figure 4.21: Evolution du retrait total des MAP à base de pouzzolane (SSB: 5000 cm<sup>2</sup>/g).

L'augmentation du retrait des éprouvettes à la pouzzolane par rapport au mortier contrôle pendant les premiers jours (pour les finesses 4200 cm<sup>2</sup>/g et 5000 cm<sup>2</sup>/g) peut être expliquée par la formation d'une porosité capillaire provoquée par la pouzzolane naturelle à courte échéance qui entraîne l'apparition d'interfaces liquide-gaz engendrant ainsi une dépression du liquide (eau interstitielle) qui doit être équilibrée par une compression du solide. Cependant, la diminution du retrait (observé après environ une semaine) des mortiers élaborés avec la pouzzolane naturelle peut être attribuée à l'activité pouzzolanique qui est lente à jeune âge (avant 28 jours) induisant ainsi un retard de formation des silicates de calcium hydratés (CSH). En conséquence, la quantité d'eau consommée par l'hydratation est moins importante induisant donc un retrait moins important par rapport à celui du mortier de référence. Des résultats similaires ont été obtenus par ITIM et al. [62] qui ont montré que la substitution de la pouzzolane à des taux supérieurs à 10% fait réduire le retrait total. Par ailleurs, CHAID et al. [90] ont montré que l'amplitude de retrait total des bétons à base de pouzzolane est plus faible que celle mesurée sur le béton contrôle.

D'autre part, MEHTA [91] a trouvé, que le retrait des bétons contenant de la pouzzolane est dans la majorité des cas plus important que celui des mélanges ne renfermant que du ciment Portland. Par ailleurs, CHABI et al. [29] ont montré que l'addition de la pouzzolane engendre un retrait plus important comparé avec celui du mortier témoin. SIAD [92] a montré que le retrait des BAP avec ajout de pouzzolane est identique à celui des BAP à base de cendres volantes et légèrement supérieur à celui des BAP avec ajout de fillers calcaire.

- **Influence de la finesse de la pouzzolane**

Les résultats du retrait en fonction de la finesse de la pouzzolane pour une substitution de 15 et 30% d'addition sont rapportés sur les figures 4.22 et 4.23. Selon ces figures, on constate que l'augmentation de la finesse de la pouzzolane engendre un retrait plus important quelque soit le taux de substitution de la pouzzolane naturelle. Cette observation est notée dès les premiers jours de l'essai. A titre d'exemple, pour une substitution de 30% de pouzzolane, l'ordre de grandeur du retrait total, à l'échéance de 28 jours, est de 294, 352 et 388  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour des finesses de 3500, 4200 et 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$  respectivement.

L'accroissement du retrait avec l'augmentation de la surface spécifique de la pouzzolane naturelle observé pour les deux taux de substitution (15% et 30%) est peut être due, d'une part, à l'activité pouzzolanique qui est élevée pour les fractions les plus fines conduisant ainsi à une forte formation d'hydrates (C-S-H) donc la quantité d'eau consommée par l'hydratation croît avec l'augmentation de la finesse engendrant ainsi un retrait plus important. D'une autre part, l'augmentation du retrait en fonction de la finesse est peut être attribuée à une grande porosité capillaire caractérisant la microstructure engendrant ainsi l'apparition d'un grand nombre de ménisques conduisant à une hydratation et une dessiccation très rapides à l'intérieur de la pâte de ciment hydraté. Par conséquent, d'importantes forces de traction font naissance et doivent être équilibrées par une compression du solide ce qui se traduit par une contraction.

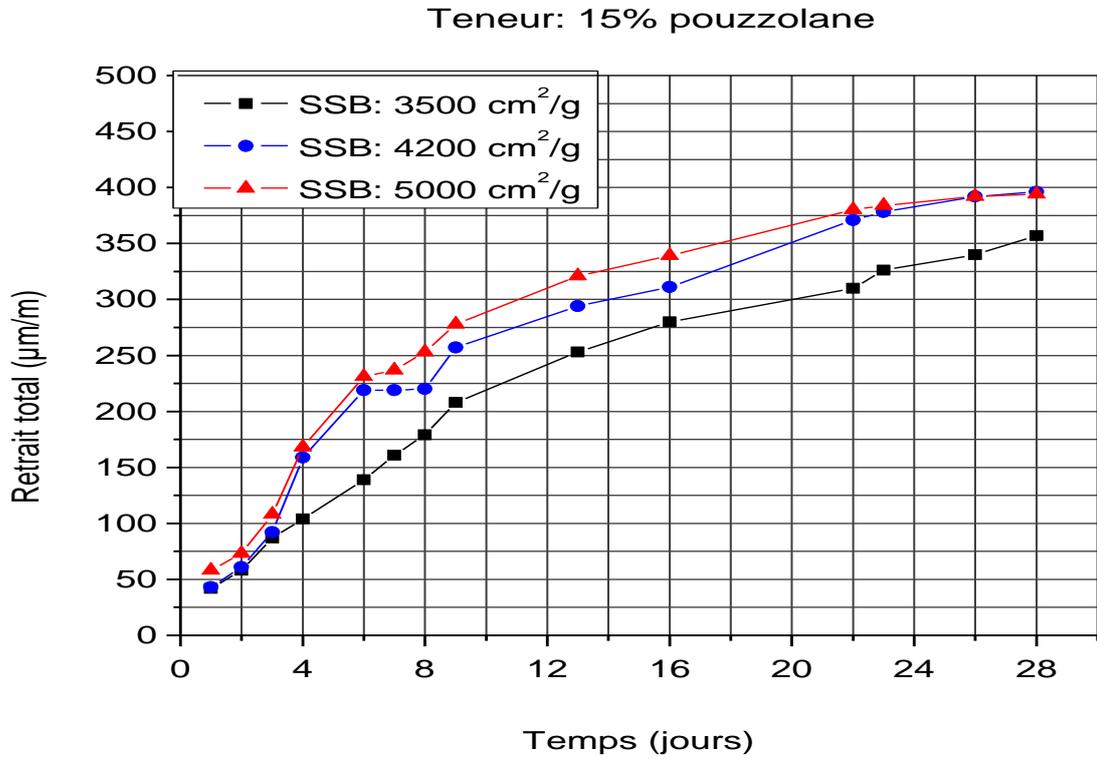


Figure 4.22: Evolution du retrait total des MAP à base de 15% de pouzzolane.

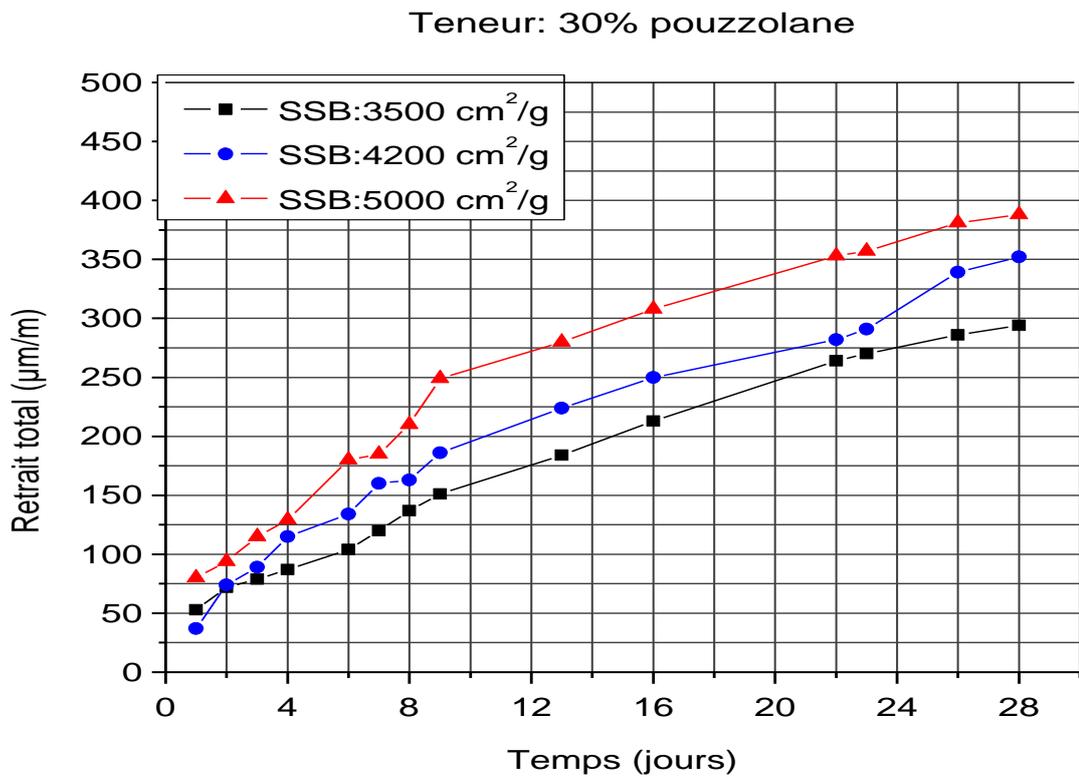


Figure 4.23: Evolution du retrait total des MAP à base de 30% de pouzzolane.

#### 4.5.2.2. Influence du laitier sur le retrait total

L'évolution du retrait des mortiers autoplaçants à base de ciment au laitier, avec les différentes finesses est donnée par le tableau 4.10.

Tableau 4.10 : Retrait des mortiers autoplaçants à base de laitier

Age (jours)	Finesse du laitier, SSB (cm <sup>2</sup> /g)								
	3500			4200			5000		
	Retrait total (µm/m)			Retrait total (µm/m)			Retrait total (µm/m)		
	0%	15%	30%	0%	15%	30%	0%	15%	30%
1	66	35	41	66	32	38	66	34	39
2	73	49	48	73	46	42	73	42	42
3	92	63	53	92	53	46	92	49	44
4	108	79	56	108	61	49	108	58	51
6	142	107	70	142	98	69	142	92	59
7	162	121	85	162	108	79	162	102	64
8	186	129	96	186	116	92	186	113	83
9	210	133	115	210	121	110	210	120	101
13	315	214	192	315	209	180	315	211	160
16	354	245	223	354	241	216	354	232	190
22	401	280	263	401	275	248	401	269	223
23	402	283	263	402	280	254	402	270	231
26	420	294	281	420	290	271	420	285	260
28	438	315	292	438	301	277	438	298	269

### • Influence du taux de substitution du laitier

Les figures 4.24, 4.25 et 4.26 illustrent l'évolution du retrait total des mortiers autoplacants à base de laitier. Selon ces figures, on peut constater que le retrait des MAP contenant 15 et 30% de laitier comme substitution au ciment est plus faible en comparaison avec celui du mortier de référence. Cette diminution de retrait est beaucoup plus prononcée après la première semaine. En effet, on observe une évolution très rapide du retrait des mortiers (MAP) sans laitier comparé avec les mortiers autoplacants à base de ciment au laitier. Cette observation est notée pour les trois finesses adoptées dans notre étude. A titre d'exemple, pour une finesse de  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ , le retrait total des mortiers contenant 15 et 30% de laitier est réduit de 123 et 146  $\mu\text{m}/\text{m}$  respectivement comparé avec le mortier de référence à l'âge de 28 jours.

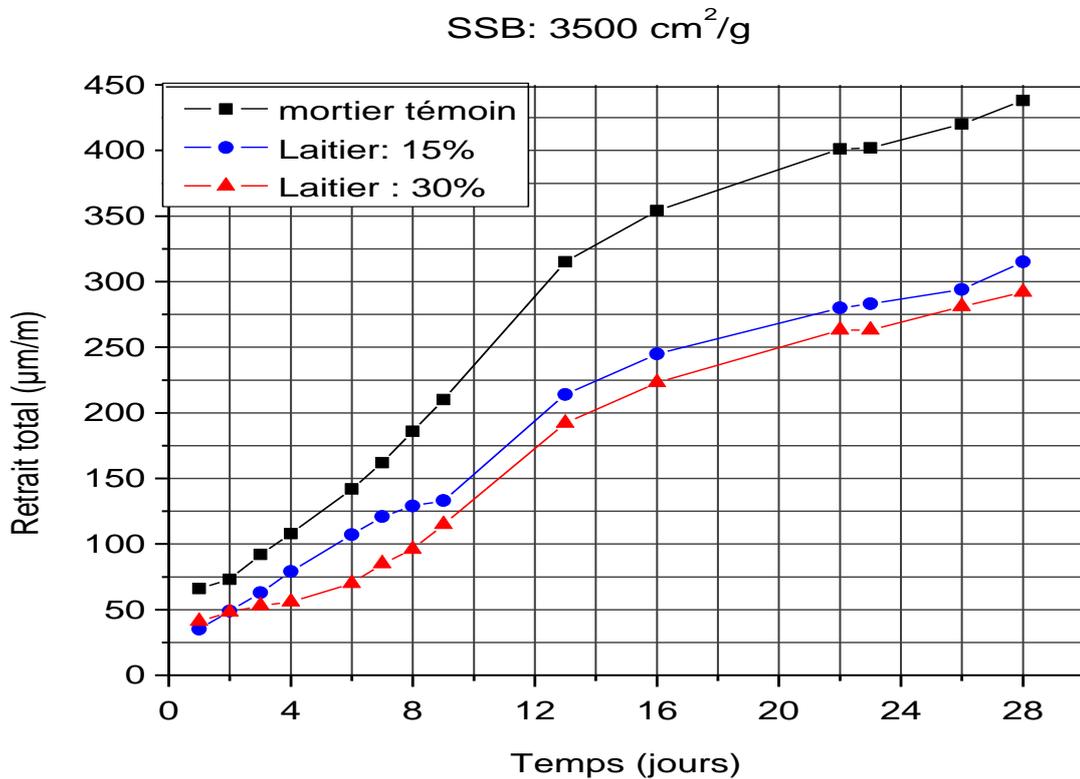


Figure 4.24: Evolution du retrait total des MAP au laitier (SSB :  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ ).

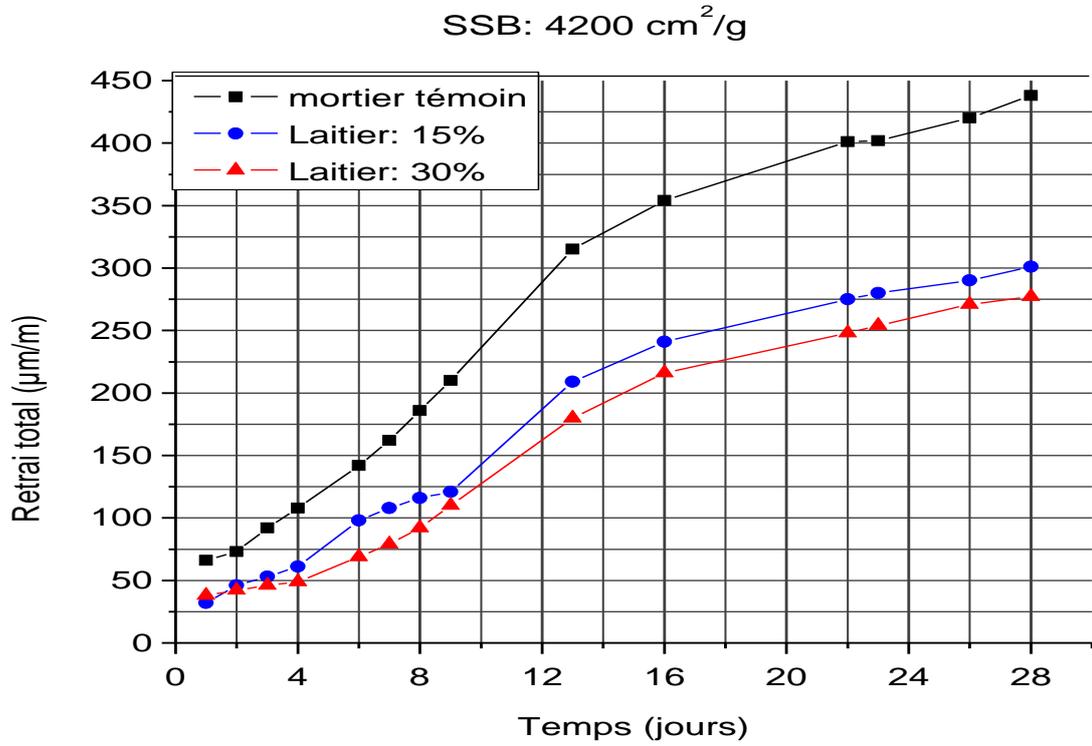


Figure 4.25: Evolution du retrait total des MAP au laitier (SSB : 4200 cm<sup>2</sup>/g).

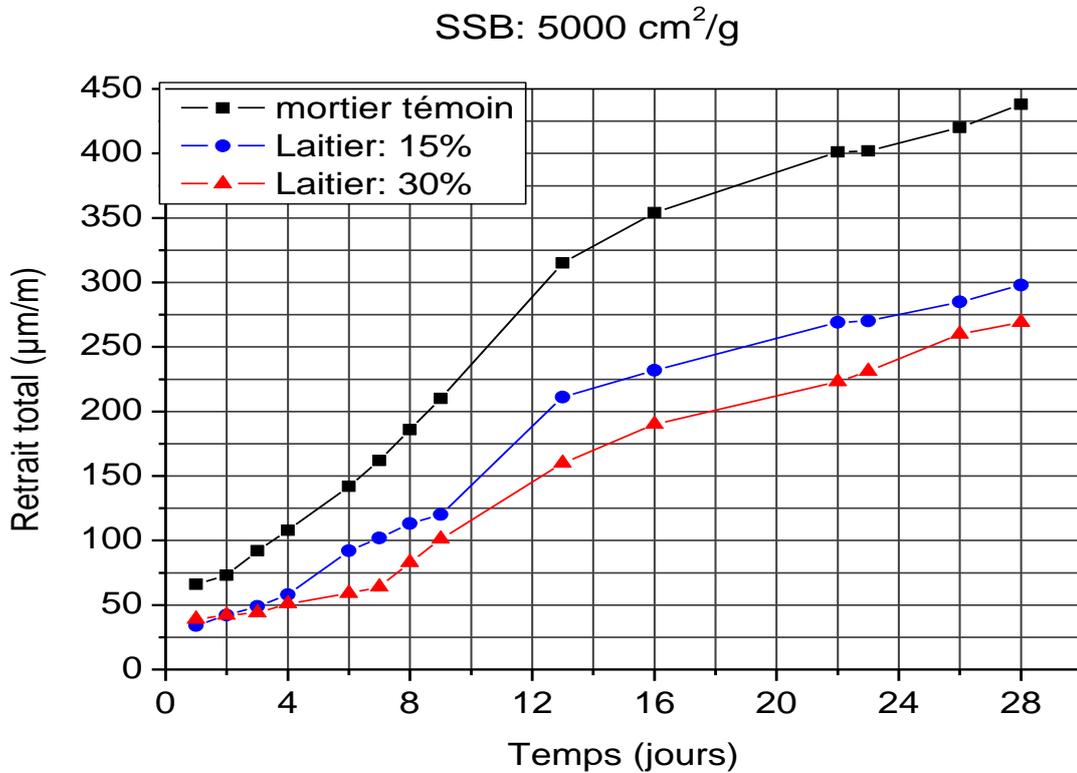


Figure 4.26: Evolution du retrait total des MAP au laitier (SSB : 5000 cm<sup>2</sup>/g).

La réduction du retrait des mortiers (MAP) au laitier peut être expliquée par le fait que 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. D'une autre part, cette diminution peut être attribuée à la densification de la microstructure des mortiers à base de laitier engendrant ainsi une dessiccation moins importante. ITIM et al. [62] ont trouvé que le laitier fait diminuer le retrait final proportionnellement aux taux de substitution. Cependant, MEHTA [93] a montré que les bétons contenant 50% de laitier développent un retrait largement supérieur par rapport au béton témoin. CHABI [29] a aussi montré que l'addition de laitier engendre un retrait plus important comparé avec celui du mortier témoin. Par ailleurs, CHEN et CHAN [94] ont trouvé que la substitution de 35% et 68% de laitier engendre un retrait des éprouvettes de mortier plus important comparé à celui du mortier contrôle.

- **Influence de la finesse du laitier**

L'influence de la finesse du laitier sur l'évolution dans le temps du retrait total des mortiers autoplaçants est illustrée sur les figures 4.27 et 4.28. L'analyse de ces figures montre que l'augmentation de la finesse du laitier n'a pas un effet significatif sur la variation de l'amplitude du retrait total des mortiers autoplaçants. Pour les deux taux de substitution du laitier (15% et 30%) utilisés. En effet, à 28 jours d'âge et pour une substitution de 15% de laitier, les valeurs du retrait sont 315, 301 et 298  $\mu\text{m/m}$  pour les finesses de 3500, 4200 et 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$  respectivement. TAZAWA et al. [95] ont trouvé que, les ciments à base de laitier ont un retrait (endogène) plus important et que le retrait est d'autant plus fort que la finesse Blaine est élevée. D'autre part, SONG et al. [96] ont montré que pour une substitution de 40% de laitier, l'augmentation de la surface spécifique du laitier de 4000  $\text{cm}^2/\text{g}$  à 6000  $\text{cm}^2/\text{g}$  ou 8000  $\text{cm}^2/\text{g}$  engendre un retrait (endogène) plus important. Par ailleurs, TAZAWA et al. [97] ont montré que l'addition de laitier d'une surface spécifique de 8000  $\text{cm}^2/\text{g}$  dans la composition des mortiers engendre un retrait (de séchage) plus important au troisième jour. Néanmoins, ils ont trouvé que le retrait diminue après l'âge de 28 jours comparé avec le mortier témoin.

## Teneur: 15% Laitier

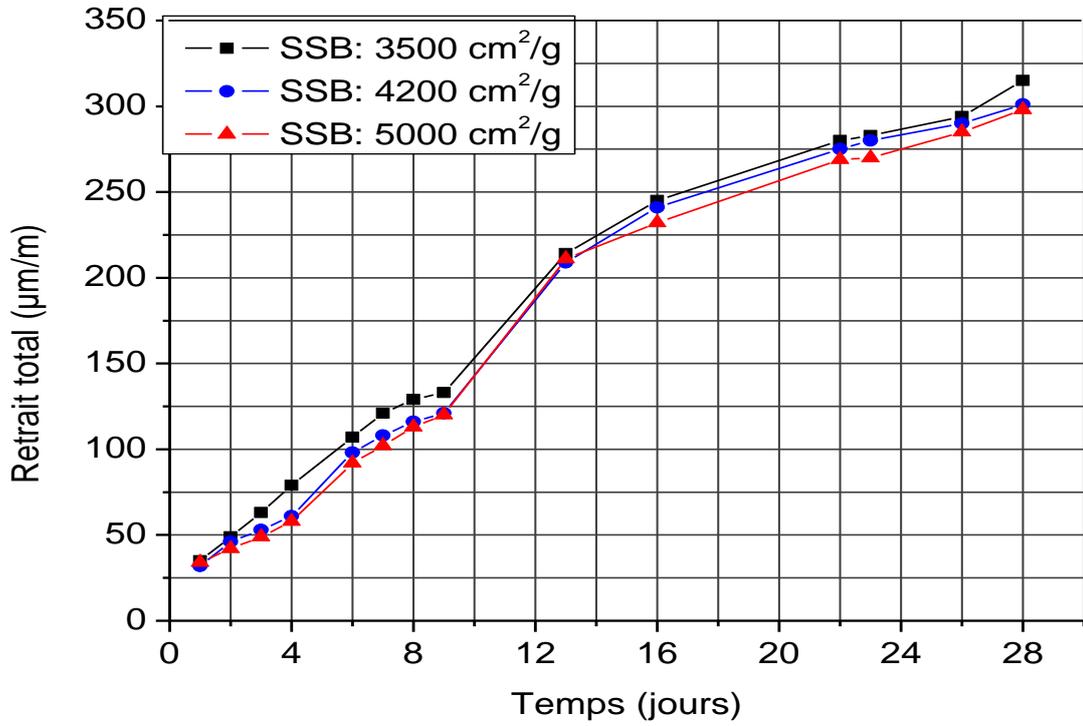


Figure 4.27: Evolution du retrait total des MAP à base de 15% de laitier.

## Teneur: 30% Laitier

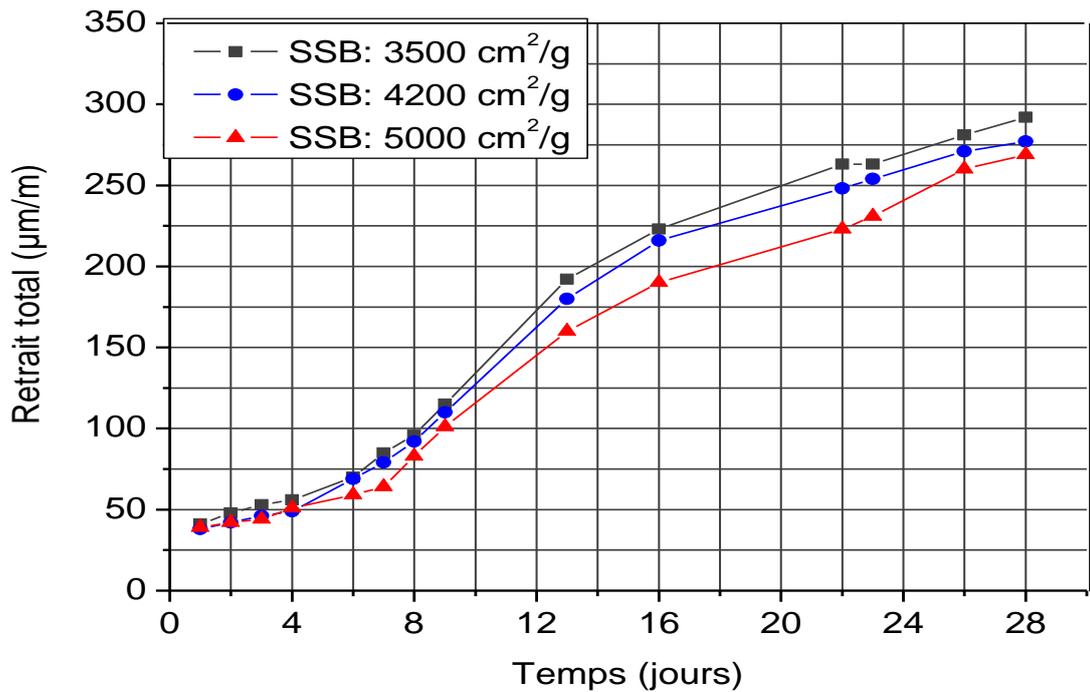


Figure 4.28: Evolution du retrait total des MAP à base de 30% de laitier.

#### 4.6. Conclusion

De ce chapitre, nous avons conclu que :

- Il est déconseillé d'utiliser la pouzzolane naturelle à plus de 30% par substitution au ciment.
- Afin d'obtenir un bon mortier autoplaçant, il est conseillé de limiter la finesse de la pouzzolane naturelle à  $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$ .
- La teneur en laitier dans le mortier doit être limitée à 30% par substitution au ciment.
- Il est conseillé de broyer le laitier à une finesse de  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$  afin d'obtenir de bonnes propriétés à l'état frais.
- A 28 d'âge, l'addition de la pouzzolane naturelle dans les compositions de MAP engendre une diminution du retrait total et ceci quelque soit la finesse de la pouzzolane. Néanmoins, le retrait total augmente avec l'augmentation de la finesse.
- La substitution du ciment par le laitier génère une diminution du retrait total. Par ailleurs, la variation de la finesse du laitier n'influe pas sur l'évolution du retrait.
- La substitution du ciment par le laitier ou la pouzzolane naturelle engendre une diminution de résistance à la compression à toutes les échéances. Néanmoins, l'écart de résistance entre les mortiers à 15% et 30% d'addition (laitier, pouzzolane) est réduit aux âges de 28 et 56 jours.
- La résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la surface spécifique de la pouzzolane mais elle diminue légèrement avec l'augmentation de celle du laitier.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette étude expérimentale a analysé l'effet de la nature des ajouts minéraux (laitier, pouzzolane) et leur finesses sur les propriétés des BAP à l'état frais, le retrait total et la résistance mécanique à la compression des MAP. Les principales conclusions de cette étude expérimentale sont les suivantes :

- Le dosage en superplastifiant doit être contrôlé afin d'obtenir un bon MAP.
- L'ouvrabilité des MAP diminue avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane. L'étalement diminue de 97,7 à 93,8 mm lorsque le pourcentage de pouzzolane augmente de 15 à 30% et de 93,8 à 92,9 mm lorsque la substitution en pouzzolane passe de 30 à 50%.
- L'augmentation de la finesse de la pouzzolane réduit légèrement l'ouvrabilité des MAP. La diminution d'étalement est de l'ordre de 1,6 et 2,8% pour les mortiers contenant de la pouzzolane naturelle d'une finesse de 4200 et 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$  respectivement comparé avec celle du mortier à base de pouzzolane d'une finesse de 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$ . (Pour une substitution de 50%).
- Il est déconseillé d'utiliser la pouzzolane naturelle à plus de 30% par substitution au ciment afin d'obtenir un bon mortier autoplaçant.
- Afin d'obtenir un bon mortier autoplaçant, il est conseillé de limiter la finesse de la pouzzolane naturelle à 4200  $\text{cm}^2/\text{g}$ .
- La substitution du ciment par 50% de laitier conduit à l'apparition d'eau de ressuage et ceci quelque soit la finesse de mouture (3500, 4200, 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$ ).
- La substitution du ciment par le laitier engendre une amélioration de l'ouvrabilité. Une augmentation de 1; 1,8 et 6,8 mm est enregistrée pour les mortiers contenant 15, 30 et 50% de laitier respectivement comparé avec celle du mortier témoin (pour une finesse de 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$ ).
- La teneur en laitier dans le mortier doit être limitée à 30% par substitution au ciment.

- L'ouvrabilité des MAP s'améliore avec l'augmentation de la finesse du laitier. L'étalement de la galette du mortier augmente de 102,3 et 103,7% pour les compositions réalisées avec du laitier d'une finesse de 4200 et 5000 cm<sup>2</sup>/g respectivement comparé avec celui du mortier à base de laitier d'une finesse de 3500 cm<sup>2</sup>/g (pour une teneur de 50%).
- Il est conseillé de broyer le laitier à une finesse de 5000 cm<sup>2</sup>/g afin d'obtenir de bonnes propriétés à l'état frais.
- L'augmentation de la teneur en pouzzolane engendre une diminution de la résistance. Elle est de l'ordre de 75, 66 et 63,9 MPa à l'âge de 56 jours pour les mortiers élaborés avec 0, 15 et 30% de pouzzolane respectivement (pour une finesse de 3500 cm<sup>2</sup>/g).
- L'augmentation de la finesse de la pouzzolane a un effet positif sur la résistance en compression. A l'âge de 56 jours, l'augmentation est de l'ordre de 2,8 et de 3,5 MPa pour les mortiers contenant de la pouzzolane broyée à une finesse de 4200 et 5000 cm<sup>2</sup>/g respectivement comparé avec celui à base de pouzzolane de finesse de 3500 cm<sup>2</sup>/g (pour une teneur de 30%).
- La résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier. Elle est de l'ordre de 75, 72,8 et 69,9 MPa à 56 jours d'âge pour les mortiers contenant 0, 15 et 30% de laitier respectivement et lorsque ce dernier est broyé à une finesse de 3500 cm<sup>2</sup>/g.
- La résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la surface spécifique du laitier. A l'échéance de 56 jours, la diminution est de 1,7 MPa pour une finesse de 4200 cm<sup>2</sup>/g et de 4 MPa pour une finesse de 5000 cm<sup>2</sup>/g comparé avec celle du mortier à base de laitier d'une finesse de 3500 cm<sup>2</sup>/g (taux de substitution de 30%).
- Lorsque le ciment est substitué par 15% et 30% de pouzzolane, le retrait total des MAP diminue. Cette réduction devient plus importante à partir de la première semaine pour une finesse de 3500 cm<sup>2</sup>/g. A 28 jours d'âge, l'écart de retrait entre les mortiers contenant 0 et 15% de pouzzolane est de l'ordre de 81 µm/m. Cette différence devient égale à 144 µm/m lorsque le ciment est substitué par 30% de pouzzolane naturelle.
- Le retrait total augmente avec l'augmentation de la finesse de la pouzzolane. Pour une substitution de 30% de pouzzolane, l'ordre de grandeur du retrait total, à l'âge de 28 jours, est de 294, 352 et 388 µm/m pour des finesses de 3500, 4200 et 5000 cm<sup>2</sup>/g.

- L'utilisation du laitier algérien dans les compositions des MAP entraîne une diminution importante du retrait total. A l'âge de 28 jours, une réduction de 123 et 146  $\mu\text{m}/\text{m}$  est notée pour les mortiers contenant 15 et 30% de laitier respectivement comparé avec le mortier de référence
- La variation de la finesse du laitier n'a pas un effet significatif sur l'évolution du retrait total. Le retrait est de l'ordre de 315, 301 et 298  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour les finesesses de 3500, 4200 et 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$  respectivement.

## **PERSPECTIVES**

- Etudier le retrait des MAP à base d'ajouts minéraux à long terme (3 à 12 mois).
- Réaliser des essais de durabilité à court et long terme sur les MAP à base d'ajouts.
- Etudier l'influence d'autres ajouts minéraux autre que le laitier et la pouzzolane naturelle sur l'ouvrabilité, le retrait et la résistance à la compression des mortiers autoplaçants.
- Etudier l'influence de la présence simultanée de plusieurs ajouts minéraux dans la composition des mortiers autoplaçants.

**ANNEXE A**  
**METHODE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER**

. Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment :  $\rho_C = 3150 \text{ kg/m}^3$
- Sable :  $\rho_S = 2560 \text{ kg/m}^3$
- Superplastifiant :  $\rho_{Sp} = 1070 \text{ kg/m}^3$
- Eau :  $\rho_E = 1000 \text{ kg/m}^3$

Coefficient d'absorption du sable  $A_b = 1,1\%$ .

Humidité du sable : 1,67%.

Le rapport Sable/Mortier est fixé à 0,5.

Le rapport  $E/L$  est fixé à 0,40.

Le superplastifiant (MEDAFLOW 30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant est fixé à 1,8% du poids du liant.

**Calcul de l'humidité du sable :**

L'échantillon de sable est pesé à l'état naturel ( $M_1$ ), il est mis dans l'étuve à 105°C pendant 8 minutes puis pesé une deuxième fois ( $M_2$ ). L'humidité du sable  $\mu_s$  est calculée par :

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

. **Calcul des quantités de chaque constituant :**

. **Le ciment**

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

$$\%C_{vol} = \frac{(1 - S/M)}{(1 + E/C_{parvolume})} * 100$$

La quantité de ciment  $C$  en **kg**:

$$C(\text{kg}) = \frac{V \times E / C_{parvolume}}{100} \times \rho_C$$

### . Le Sable

La quantité du sable en kg est  $S$

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

### . 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, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et 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 qui suit la première.

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

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

La quantité d'eau globale  $E$  en litre :

$$E = \left(\frac{V \times \%E_{vol} \times \rho^E}{100 \times 1000}\right) - \left(\frac{Sp \times 70}{100}\right) - \left(\frac{V \times S/M \times \rho_s}{1000} \times \frac{\text{correction}}{100}\right)$$

#### Eau1

$$E_1 = E \times 0.70$$

#### Eau2

$$E_2 = E \times 0.30$$

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AFGC, “Recommandations pour l’emploi des bétons autoplaçants”, Documents scientifiques et techniques, 2000, 63 p.
- [2] Les Bétons : “Formulation, Fabrication et Mise en œuvre”, G11, collection technique CimBéton, 134 p.
- [3] Girish, S., Ranganath, R.V., Vengala, J., “ Influence of powder and paste on flow properties of SCC”, Construction and Building Materials, Vol. 24, 2010, pp. 2481-2488.
- [4] Turcry, P., “Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants - Influence de la Formulation”, Thèse de Doctorat de l’Ecole Centrale de Nantes, 2004, 230 p.
- [5] Rizwan, S.A., Bier, T.A., Ahmad, H., “Self-Compacting Concrete - A useful technology”, Pakistan Engineering Congress, 70th Annual Session Proceedings, pp. 294-319.
- [6] Petersson, O., Billberg, P., “Investigation on blocking of Self-Compacting Concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler”, Proceeding Of the 1<sup>st</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 333-344.
- [7] Okamura, H., Ouchi, M., “Self-Compacting Concrete”, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, N° 1, 2003, pp. 5-15.
- [8] Bethmont, S., “Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) ”, Thèse de Doctorat de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2005, 166 p.
- [9] Behim, M., Boucetta, T.A., “Effet des additions micronisées sur l’écoulement des bétons autoplaçants (Laitier de haut fourneau, Filler calcaire et Poudre de verre) ”, 1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, Oran, Algeria, 2009, pp. 423- 430.
- [10] Nehdi, M., Pardhan, M., Koshowski, S., “Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements”, Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004, pp. 2103-2112.
- [11] Zhu, W., Gibbs, J.C., “Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp. 1457-1462.

- [12] Yahia, A., Tanimura, M., Shimoyama, Y., "Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler of powder content and W/C ratio", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, pp. 532-539.
- [13] Ferraris, C.F., Obla, K.H., Hill, R., "The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp. 245-255.
- [14] Boukendakdji, O., Kenai, S., Kadri, E.H., Rouis, F., "Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, 2009, pp. 2593-2598.
- [15] Kadri, E.H., Duval, R., "Effect of ultrafine particules on heat of hydration of cement mortars", *ACI Materials Journal*, 2002, pp. 138-142.
- [16] Amouri, C., "Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) ", Thèse de Doctorat de l'université Mentouri, Constantine, Algérie, 2009, 158 p.
- [17] Kim, B.G., Jiang, S., Jolicoeur, C., Aiticin, P.C., " The adsorption behavior of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp. 887-893.
- [18] Edamatsu, Y., Ouchi, M., "A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in Self-Compacting Concrete", *Proceeding of the 1<sup>st</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 121-130.
- [19] Ozawa, K., Tangtermsirikul, S., Maekawa, K., "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*, 1992, pp. 121-137.
- [20] Tangtermsirikul, S. and Van, B.K., "Blocking criteria for aggregates phase of Selfcompacting high performance concrete", *Proceedings of Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering*, Bangkok, pp. 58-69, 1995.
- [21] Felekoglu, B., Turkel, S., Baradan, B., "Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete", *Building and Environment*, Vol. 42, 2007, pp. 1795-1802.

- [22] Fares, H., "Propriétés mécaniques et physico-chimiques des bétons autoplaçants exposés à une température élevée", Thèse de Doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, 2009, 206 p.
- [23] Koliass, S., Georgiou, C., "The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, 2005, pp. 211-216.
- [24] Péra, J., Hussonb, S., Guilhot, B., "Influence of finely ground limestone on cement hydration", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, 1999, pp. 99-105.
- [25] Felekoğlu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A., Uyulgan, B., "The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp. 1719-1726.
- [26] Felekoğlu, B., Yardimci, M.Y., Baradan, B., "A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete", 3<sup>rd</sup> International Rilem Symposium on self-compacting concrete, 2003, pp. 446-456.
- [27] Siddique, R., "Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash", *Materials and Design*, 2010, pp. 1-7.
- [28] Liu, M., "Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, 2010, pp. 1245-1252.
- [29] Chabi, S., Mezghiche, B., Guettala, H., "Etude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers", *Courrier du Savoir*, N° 05, 2004, pp. 03-08.
- [30] Parra, C., Valcuende, M., Gomez, F., "Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, 2010, pp. 1-7.
- [31] Domone, P.L., "A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 2007, pp. 1-12.
- [32] Assié, S., "Durabilité des bétons autoplaçants", Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2004, 254 p.
- [33] Persson, B., "A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp. 193-198.

- [34] Klug, Y., Holschemacher, K., “Comparison of the hardened properties of self-compacting concrete and normal vibrated concrete”, Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 2003, pp. 596 - 607.
- [35] Tragardh, J., “Microstructural features and related properties of self-compacting concrete”, First International Rilem Symposium on self-compacting concrete, 1999, pp. 175-186.
- [36] Assié, S., Escadeillas, G., Waller, V., “Estimates of self-compacting concrete ‘potential’ durability”, Construction and Building Materials, Vol. 21, 2007, pp. 1909-1917.
- [37] Zhu, W., Bartos, J.M., Permeation properties of self-compacting concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, pp. 921-926.
- [38] Pereira, L.A., “Study of sorptivity of self-compacting concrete with mineral additives”, Journal of Civil Engineering and Management, Vol. XII, N° 3, 2006, pp. 215-220.
- [39] Bétons et ouvrages d’art, “la durabilité des bétons”, Collection Techniques CimBéton, 2004, 93 p.
- [40] Yazici, H., “The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete”, Construction and Building Materials, Vol. 22, 2008, pp. 456-462.
- [41] Valcuende, M., Parra, C., “Natural carbonation of self-compacting concrete”, Construction and Building Materials, Vol. 24, 2010, pp. 848-853.
- [42] GCI 714, “Durabilité et réparations du béton”, Université de Sherbrooke, pp. 28-62.
- [43] Holt, E., Shodet, O., Self-Compacting Concrete: Early Age Shrinkage”, Technical Report, 2002, pp. 1-26.
- [44] “Plastic Shrinkage Cracking”, Cement concrete and aggregates Australia, 2005, pp. 1-4.
- [45] NRMCA, “Concrete in practice, what, why and how?” 1998, pp. 1-2.
- [46] Turcry, P., “Le retrait plastique des bétons autoplaçants. Etude paramétrique de l’influence de la formulation”, XXI<sup>EMES</sup> Rencontres universitaires de Génie Civil, 2003, pp. 247-256.
- [47] Song, H.W., Byun, K.J., Kim, S.H., Choi, D.H., “Early-Age creep and shrinkage in Self-Compacting Concrete incorporating GGBFS”, Proceedings of the second International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, 2001, pp. 413-422.

- [48] Gram, H. E., Piiparinen, P., “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, 1999, pp. 211-225.
- [49] Turcry, P., Loukili, A., “Evaluation of plastic shrinkage cracking of self-consolidating concrete”, ACI Materials Journal, 2006, pp. 272-279.
- [50] Bouasker, M., Grondin, F., Mounanga, P., Khelidj, A., “Analyse multi-échelles du retrait endogène des matrices cimentaires au jeune âge”, 18<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, 2007, pp. 1-7.
- [51] Bouasker, M., “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, 2007, 202 p.
- [52] Jiang, Z., Sun, Z., Wang, p., “Autogenous relative humidity change and autogenous shrinkage of high-performance cement pastes”, Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp. 1539-1545.
- [53] Zang, M.H., Tam, C.T., Leow, M.P., “Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, pp. 1687-1694.
- [54] Persson, B.S.M., “Shrinkage of high performance concrete”, Proceeding of International Workshop on Autogenous Shrinkage, 1998, pp. 105-115.
- [55] Tazawa, E., Miyazawa, S., “Effect of constituents and curing condition on autogenous shrinkage of concrete”, Proceeding of International Workshop on Autogenous Shrinkage of concrete, 1998, pp. 257-268.
- [56] Alrifai, A., Aggoun, S., Gabrillac, R., “Influence des paramètres de formulation sur le retrait endogène des pâtes et des mortiers issus de BAP”, XXVI<sup>e</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil, pp. 1-8.
- [57] Mounanga, P., “Étude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge: hydratation, retraits, propriétés thermophysiques”, Thèse de Doctorat de l’université de Nantes, 2004, 245 p.
- [58] Jensen, O.M., “Influence of cement composition on autogenous deformation and change of the relative humidity”, International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete, 2000, pp. 143-153.

- [59] Bouny, B.V., Kheirbek, A., “Effect of mix parameters on autogenous deformation of cement pastes- microstructural interpretations”, International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete, 2000, pp. 115-141.
- [60] Schiebl, P., Plannerer, M., Brandes, C., “Influence of binders and admixtures on autogenous shrinkage of high performance concrete”, International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete, 2000, pp. 179- 190.
- [61] Lura, P., Breugel, K.V., Maruyama, I., “Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 31, 2001, pp. 1867-1872.
- [62] Itim, A., Ezziane, K., Kadri, E.H., “Etude des déformations de retrait d’un mortier contenant différentes additions minérales”, Symposium International sur la Construction en Zone Sismique, 2010, pp. 1-10.
- [63] Pons, G., Proust, E., Assié, S., “Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete?” Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 2003, pp. 645-645
- [64] Lee, K.M., Lee, H.K., Lee, S.H., Kim, G.Y., “Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag”, Cement and Concrete Research, Vol 36, 2006, pp. 1279–1285.
- [65] Ayed, K., Benaissa, A., Vidal, T., Pons, G., Abidlah, A., “Etude du comportement différencié du BAP, l’influence de la pouzzolane naturelle de Béni- Saf sur le retrait endogène du béton autoplaçant”, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, 2009, pp. 283-288.
- [66] Neville, A.M., “Propriétés des Bétons”, traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles, 2000.
- [67] Sonebi, M., Bartos, P.J.M., “Hardened SCC and its bond with reinforcement”, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 1999, pp. 275-289.
- [68] Sakata, K., “Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete”, International Conference 2, 1998, pp. 2057-2064.
- [69] Khatib, J.M., “Performance of self-compacting concrete containing fly ash”, Construction and Building Materials, Vol. 22, 2008, pp. 1963-1971.

- [70] Boukendakdji, O., "Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant", Thèse de Doctorat de l'université de Blida, 2010, 185 p.
- [71] Domone, P.L.J., Jin, J., "Properties of mortar for Self-Compacting Concrete", Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, 1999, pp. 109–120.
- [72] Aichoube, A., Ghrici, M., Benaïssa, A., "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, 2005, pp. 6-7.
- [73] Ezziane, K., Kadri, E.H., Hallal, A., Duval, R., "Effect of mineral additives on the setting of blended cement by the maturity method", Materials and Structures, Vol. 43, 2010, pp. 394 - 401.
- [74] Colak, A., "Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pouzzolan", Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, pp. 585-593.
- [75] Bouglada, M. S., "Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier", Mémoire de Magister de l'université de Msila, 2008, 148 p.
- [76] Belhachemi, B., "Influence de la surface spécifique Blaine sur les résistances d'un ciment pouzzolanique", Colloque Méditerranéen sur les Matériaux CMEDIMAT, Oran, Algérie, 2005, pp. 6-7.
- [77] Manai, K., "Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants", Mémoire de maîtrise des sciences appliquées, Sherbrooke, Canada, 1995.
- [78] Li, Z., Ding, Z., "Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag", Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, pp. 579-584.
- [79] Shi, Y.X., Matsui, I., Guo, Y.J., "A study on the effect of fine mineral powders with distinct vitreous contents on the fluidity and rheological properties of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004, pp. 1381-1387.
- [80] Benkaddour, M., Kazi Aoual, F., Semcha, A., "Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle", Revue Nature et Technologie, 2009, pp. 63-73.

- [81] Mansour, S., “Etude des propriétés des mortiers et bétons à base de ciments ternaires”, Mémoire de Magister de l’université de Blida, 2003.
- [82] Targan, S., Olgun, A., Erdogan, Y., Sevinc, V., “Influence on natural pozzolan , colematite ore waste , bottom ash and fly ash on the properties of Portland cement” , Cement and Concrete Research , Vol 33 , 2003, pp. 1175 – 1182.
- [83] Khan, M.I., Alhozaimy A.M., “Performance of concrete utilizing the natural pozzolanic material available in the kingdom of Saudi Arabia”, Final Research Report, Vol. 33, 2005, pp. 1-23.
- [84] Escalant, J.I., Gómez, L.Y., Johal, K.K., Mendoz., G., Mancha, H., Méndez, .J., “Reactivity of blast furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions”, Cement and Concrete Research, Vol. 31, 2001, pp. 1403-1409.
- [85] Menendez, G., “Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast furnace slag”, Cement and Concrete Research, Vol. 25, 2003, pp. 61- 67.
- [86] Kourounis, S. et al., “Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag”, Cement and Concrete Research, Vol. 37, 2007, pp. 815-822.
- [87] Bougara, A., Lynsdale, C., Ezziane, K., “Activation of Algerian slag in mortars”, Construction and Building Materials, Vol. 33, 2007, pp. 542-547.
- [88] Oner, A., Akyuz, S., “An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete, Cement and Concrete Composites, Vol. 29, 2007, pp. 505-514.
- [89] Naceri, A., “Influence de la teneur en laitier et sa surface spécifique sur la résistance du mortier durci”, First International Conference on Environmental Engineering, 2005, pp. 1232-2241.
- [90] Chaid, R., Jauberthie, R., Boukhaled, A., Talah, A., “Endommagement, Déformations et microstructure des BHP de pouzzolane”, First International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, 2009, pp. 12-14.
- [91] Mehta, P.K., “Pouzzolanes naturelles, dans, Matériaux complémentaires en cimentation”, Editeur V.M. Malhortra, 1987, pp. 3-38.
- [92] Siad, H., “Influence du type d’addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplacants”, Thèse de Doctorat de l’Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 2010, 261 p.

- [93] Mehta, P.K., "Pozzolanic and cementitious by-products in concrete : Another look", Proceedings of the 3th CANMET/ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Norway, 1989, pp.1 - 43.
- [94] Chen, J.C., Chan, Y.W., "Effect of temperature and humidity conditions on the strength of blast furnace slag cement concrete", Proceedings of the 3th CANMET/ACI International Conference of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Norway, 1989, pp. 1377 - 1397.
- [95] Tazawa, E., Miyazawa, S., "Influence of constituents and compositions on autogenous shrinkage of cementitious materials", Magazine of Concrete Research, vol. 49, 1997, pp. 15 - 22.
- [96] Song, H.W., Byun, K.J., Kim, S.H., Choi, D.H., "Early-age creep and shrinkage in Self-Compacting Concrete incorporating GGBFS", 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 2001, pp. 413- 422.
- [97] Tazawa, E., Yonekura, A., Tanaka. S., "Drying shrinkage and creep of concrete containing granulated blast furnace slag", Journals Search Results, 1989, pp. 1325-1344.