

UNIVERSITE DE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté des Science de l'Ingénieur

Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Construction

**FORMULATION ET PROPRIETES RHEOLOGIQUES DES
BETONS AUTOPLAÇANTS A BASE D'UN CIMENT
A LA POUZZOLANE NATURELLE**

Par

Mohamed Amine ALLALI

Devant le jury composé de :

M. ABED	Professeur, USDBlida	Président
M.GHRICI	Professeur, U.de Chlef	Examineur
A.BOUKNI	Maitre de conférences A, USDBlida	Examineur
S. KENAI	Professeur, USDBlida	Rapporteur
B. MENADI	Maître de conférences A, USDBlida	Co-Rapporteur

Blida, Avril 2012

RÉSUMÉ

Les Béton Autoplaçants (BAP) sont des matériaux très fluides qui se mettent en place sans vibration. Afin de garantir une très bonne fluidité avec une homogénéité satisfaisante, ces bétons consomment beaucoup plus de ciment et de superplastifiant. Ces bétons utilisent aussi les ajouts minéraux comme le laitier, la pouzzolane ou les fillers calcaire pour des raisons techniques et environnementales. Ces ajouts minéraux sont disponibles en abondance en Algérie mais malheureusement elles restent encore non exploitées suffisamment comme additions aux mélanges cimentaires. C'est dans ce contexte que se situe l'étude menée dans ce travail. Où la pouzzolane naturelle (PZN) de Béni-Saf (Algérie) a été utilisée comme qu'addition minérale dans la composition du BAP. Les essais (Étalement, V-Funnel, L-Box, J-Ring, U-Box, Stabilité au Tamis) ont été réalisés pour analyser les caractéristiques rhéologiques du BAP. L'influence de la finesse de la PZN a aussi été analysée. Les résultats ont montré que l'augmentation du taux de substitution du ciment par la PZN ainsi que l'augmentation de sa finesse fait augmenter la viscosité du béton, causant ainsi un mauvais comportement au niveau de la mobilité en milieu confiné (V-Funnel, L-Box, J-Ring, U-Box). Cependant les deux autres caractéristiques, qui sont la mobilité en milieu non confiné (Étalement) et la stabilité au tamis ont été satisfaits.

Mot clés : Béton autoplaçant, Pouzzolane Naturelle, Finesse, Rhéologie, Stabilité.

ABSTRACT

Self-Compacting Concrete (SCC) are very fluid materials that fall into place without vibration. SCC uses a lot more cement and superplasticizer to ensure a good workability with satisfactory homogeneity, SCC also use mineral additions such as slag, pozzolan or limestone fillers for technical and environmental reasons. These mineral additions are available in abundance in Algeria but unfortunately they are still not sufficiently used as additions to cementitious mixture. This experimental work studies SCC using natural pozzolan (NPZ) from Beni Saf (Algeria), Tests (Spread, V-Funnel, L-Box J-Ring, U-Box, Stability sieve) were performed to analyse the rheological characteristics of SCC. The influence of the fineness of NPZ was also studied. The results have shown that increasing the rate of substitution of cement by the NPZ and increasing its fineness increases the viscosity of the concrete, causing adverse behavior at the level of mobility in confined surroundings (V Funnel-, L-Box, J-Ring, U-Box). However, the other two characteristics, which are mobility in unconfined surroundings (Spread) and stability, were satisfactory.

Keywords : Self-Compacting Concrete, Natural Pozzolan, Fineness, Rheology, stability.

ملخص

الخرسانة المرصوصة ذاتيا هي مادة عالية السيولة و هي قادرة على التوضع دون الحاجة إلى جهد ميكانيكي. تستهلك الخرسانة المرصوصة ذاتيا الكثير من الأسمنت و المواد الكيميائية (الملدنات الممتازة) و سبب ذلك هو ضمان تدفق جيد مع تجانس مرض. تستعمل الخرسانة المرصوصة ذاتيا كذلك الإضافات المعدنية لأسباب تقنية و بيئية مثل خبث الفرن العالي, البوزولان أو الحجر الجيري. هذه المواد تتوفر بكثرة في الجزائر و لكن للأسف لا تزال إلى وقتنا الحالي غير مستغلة بما فيه الكفاية كإضافات إلى الخليط الإسمنتي. و في هذا السياق تدرج الدراسة المنجزة في هذا العمل. تم إضافة البوزولان الطبيعي المستخرج من بني صاف (الجزائر) في تصنيع خرسانة مرصوصة ذاتيا. تم القيام باختبارات تجريبية لدراسة تأثيرها على خصائص الخرسانة في الحالة الطرية و تتمثل هذه الاختبارات في (Etalment, V-Funnel, L-Box, J-Ring, U-Box, Stabilité au Tamis). كما تم دراسة تأثير نعومة البوزولان على هذه الخصائص. و قد أظهرت النتائج أن زيادات معدل الاستبدال من الاسمنت بالبوزولان الطبيعي و زيادة نعومته يزيد من لزوجة الخرسانة, مما يؤثر على سهولة الحركة في بيئة محصورة. لكن يجب ملاحظة أن الحركة في بيئة غير محصورة و الاستقرار قد تم تحقيقهما.

الكلمات المفاتيح : الخرسانة المرصوصة ذاتيا, البوزولان الطبيعي, النعومة, الخصائص الريولوجية, الاستقرار.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu Dieu le miséricordieux qui nous a donné du courage et de la volonté avec lesquels ce mémoire a été achevé.

La présente étude s'est déroulée au Laboratoire de Matériaux et Génie Civil de l'Université de Saad Dahleb de Blida.

Je désire donc en tout premier lieu adresser toute ma reconnaissance à mon encadreur, M. Kenai Said, Professeur à l'université de Blida, pour m'avoir fait confiance et m'avoir dirigée pendant cette année. Je tiens tout particulièrement à le remercier pour sa patience tout au long de ce travail, ainsi que pour la richesse de ses idées. Espérant avoir l'occasion de travailler avec lui dans le futur, qu'il trouve ici l'expression de ma respectueuse gratitude.

Un grand merci à notre Co-encadreur Monsieur Menadi Belkacem, Maitre de conférences à l'université de Blida pour son aide, sa disponibilité, et pour la confiance qu'elle faisait en nous, et également pour sa gentillesse et sa modestie. Je le remercie pour le temps qui a consacré pour corriger ce mémoire.

J'exprime ma plus sincère gratitude aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant de juger notre travail :

- ◆ Monsieur M. ABED, Professeur à l'Université Saad Dahlab-Blida, président du jury ;
- ◆ Monsieur M. GHRICI, Maitre de Conférences à l'université de Chlef, examinateur ;
- ◆ Monsieur A. BOUIKNI, Maitre de Conférences à l'Université Saad Dahlab-Blida, examinateur.

Je tiens à remercier le chef de notre Département de Génie Civil et le responsable du Poste de Graduation, ainsi que tous les personnels travaillant dans notre Département.

Je tiens à adresser toute ma gratitude à M^f Boukendakdji O, Maitre de conférences à Universitaire de Médéa, mes chaleureux remerciements vont vers cette personne.

Je tiens à adresser toute ma gratitude à Hadj Sadok Ahmed, Docteur à l'Ecole National de L'Hydraulique de Blida, pour sa disponibilité, ses conseils et ses orientations au cours de notre travail expérimentale.

Je remercie le directeur de la cimenterie Monsieur Abib Zineddine de Lafarge pour l'approvisionnement en ciment CRS.

Mes sincères remerciements vont également au groupe GRANITEX, qui a contribué à la réalisation de ce travail par la fourniture des superplastifiants (MEDAFLOW 30).

Je voudrais remercier également le chef de département de chimie industrielle à l'Université de Saad Dahleb pour l'accueil et la mise en disposition du broyeur pour la pouzzolane naturelle.

Je tiens à remercier la direction du laboratoire de la cimenterie de Meftah pour la réception et la mesure de la finesse de la pouzzolane naturelle.

Je souhaiterai également remercier Monsieur Fortas Abdelkader, laborantin de laboratoire de la Géomatériaux du département de Génie Civil de l'Université de Blida pour leur aide précieuse et leur soutien permanent.

Mes remerciements s'adressent de même à tous mes collègues de travail qui m'ont aidé au cours de cette année dans le laboratoire : Kouider Djelloul Omar, Azzaz Rahmani Abdessamed, Bouzanna Mehdi, Si-Ahmed Mohamed, Debbih Amina, Hammat Siham, Je les remercie encore pour leur gentillesse spontanée et pour tous les moments que nous avons traversés ensemble.

Mes vifs remerciements de tout mon cœur à ma famille et en particulier mes parents qui m'ont soutenu durant mes études et qui m'ont toujours encouragé. Leur générosité est inestimable. Qu'ils trouvent ici le témoignage de mon affection. Je leur dédie ce mémoire. Merci aussi à tous mes amis.

Je voudrai exprimer mes sincères remerciements à tous les enseignants qui m'ont encouragé tout au long de mon brillant parcours.

Je terminerai en remerciant tout ceux et celles qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

TABLE DES MATIERES

RESUME

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE	21
CHAPITRE 1: LE BÉTON AUTO-PLAÇANT - SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	23
1.1 Généralités	23
1.2 Définition et historique	23
1.3 Avantages techniques et socio-économiques.....	23
1.4 Matériaux constituant le BAP	24
1.4.1 Ciment.....	24
1.4.2 Additions minérales	24
1.4.3 Les granulats.....	25
1.4.4 Eau de gâchage	25
1.4.5 Les adjuvants	25
1.5 Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP.....	27
1.6 Formulation des bétons autoplaçants.....	31
1.6.1 Particularité de la composition des BAP	31
1.6.2 Les approches de formulation.....	33
i. Optimisation des mortiers	33
ii. Optimisation du volume de pâte	35
iii. Optimisation du squelette granulaire	36
iv. Approche basée sur un plan d'expérience	36
v. Approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE.....	37

1.7 Propriétés mécaniques du béton durci	37
1.7.1 Résistance à la compression	37
1.7.2 Module d'élasticité	41
1.7.3 Résistance à la traction	43
1.7.4 Retrait	45
i. Retrait de séchage (dessiccation)	46
ii. Retrait endogène (d'auto-dessiccation).....	48
iii. Retrait plastique	52
iv. Retrait thermique.....	53
1.7.5 Fluage (Déformations sous charge)	53
1.8 Propriétés physico-chimiques et durabilité.....	58
1.8.1 Perméabilité aux gaz.....	58
1.8.2 Diffusion des ions chlore	60
1.8.3 Absorption capillaire	64
1.8.4 Carbonatation.....	66
1.8.5 Cycles de gel-dégel.....	67
1.8.6 Résistance aux sulfates	69
1.9 Conclusion	70
CHAPITRE 2 : MATERIAUX ET ESSAIS	71
2.1 Introduction.....	71
2.2 Caractérisation des matériaux	71
2.2.1 Ciment.....	71
2.2.2 La pouzzolane naturelle	72
2.2.3 Les granulats	75
2.2.3.1 Le sable	75
2.2.3.2 Le gravier	75
2.2.4 Les adjuvants	76

2.2.5 L'eau de gâchage	76
2.3 Procédure de Formulation du BAP	77
2.3.1 Formulation et confectionnement du mortier	77
2.3.2 Formulation et confectionnement du BAP	79
2.4 Caractérisation du mortier des BAP à l'état frais	80
2.4.1. Essai d'étalement au Mini-Cône	81
2.4.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)	81
2.5 Caractérisation du BAP à l'état frais	82
2.5.1 Essai d'étalement au cône.....	83
2.5.2 Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)	85
2.5.3 Essai à la boîte en L (L-Box test)	86
2.5.4 Essai à la boîte en U	87
2.5.5 Essai à la couronne J (J-Ring test).....	88
2.5.6 Essai de stabilité au tamis	91
2.6 Récapitulatif du programme des essais réalisés	93
2.6.1 Essais sur mortier.....	93
2.6.2 Essais sur béton.....	94
CHAPITRE 3 RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS.....	95
3.1 Introduction.....	95
3.2 Optimisation de dosage du superplastifiant	95
3.2.1 Etalement au mini cône pour les mortiers	96
3.2.2 Temps d'écoulement à l'entonnoir en V-Funnel pour mortiers.....	97
3.3 Effet de la pouzzolane naturelle sur l'ouvrabilité du BAP	98
3.3.1 Etalement et Temps T_{50} au cône d'Abrams	99
3.3.2 Etalement et Temps T_{50} et B_j au J-ring	107
A. Etalement.....	107
B. Temps d'étalement au J-Ring T_{50j}	109

C. Différence de hauteur Bj.....	111
3.3.3 Temps d'écoulement au V-Funnel.....	113
3.3.4 Résultats de L-Box	116
A. Rapport H_2/H_1	116
B. Temps d'écoulements T_{20} et T_{40}	117
3.3.5 Résistance à la Ségrégation par Tamisage.....	120
3.3.6 Résultats d'U-Box	122
3.4 Conclusion	123
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS	124
REFERENCES	126
ANNEXE A : GENERALITE SUR LE BROYAGE	137
ANNEXE B : EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER.....	141
ANNEXE C : EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON	145

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Liste des Figures

Figure 1.1	Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment	26
Figure 1.2	Influence de dosage de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton.....	27
Figure 1.3	Différents Comportements d'écoulement des fluides.....	28
Figure 1.4	Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton.....	29
Figure 1.5	Interprétation physique du modèle de Bingham	30
Figure 1.6	Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAB	32
Figure 1.7	Essai d'étalement au cône	34
Figure 1.8	Relation entre les termes Γ_m et R_m	35
Figure 1.9	Notion d'excès de pâte.....	35
Figure 1.10	Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant	38
Figure 1.11	Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP	38
Figure 1.12	Influence du rapport F/L sur la résistance à la compression	39
Figure 1.13	Développement de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C.....	40
Figure 1.14	Variation du module d'élasticité en fonction de la résistance en compression.....	42

Figure 1.15	Comparaison des modules d'élasticité des BAP est béton léger auto-plaçants.....	42
Figure 1.16	Résistance en traction à 7 jours	43
Figure 1.17	Résistance en traction à 28 et 90 jours	44
Figure 1.18	(a) Déformation différée de retrait d'un spécimen non chargé (b) Variation volumique d'une éprouvette de béton au retrait	45
Figure 1.19	Influence de la cendre volante sur le retrait de séchage	47
Figure 1.20	La variation retrait en fonction du dosage de FA à 56 jours de cure.....	48
Figure 1.21	(a) Ponts cristallins lors de la prise (b) Fissures de retrait sur la coupe d'une éprouvette	49
Figure 1.22	Auto-dessiccation de la pâte de ciment en cours d'hydratation	50
Figure 1.23	Variation de retrait totale et retrait endogène des BAP de la série 1	51
Figure 1.24	Variation du perte de masse des BAP de la série 2	51
Figure 1.25	Variation de retrait totale et retrait endogène des BAP de la série 3.....	52
Figure 1.26	Dépendance du fluage spécifique du rapport E/C	54
Figure 1.27	Déformations sous charge unitaire pour des bétons de résistance supérieure à 40 MPa	56
Figure 1.28	Coefficients de fluage à 180 jours en fonction de la résistance mécanique	56
Figure 1.29	Coefficients de fluage moyen en fonction de l'âge après chargement	57
Figure 1.30	Représentation schématique du système poreux d'une pâte de ciment hydraté.....	58

Figure 1.31	Perméabilité apparent des bétons étudiés à l'oxygène	60
Figure 1.32	Valeurs du coefficient effective de diffusion des ions chlore des bétons étudiés.....	61
Figure 1.33	Pénétration d'ions chlorure à 28 et 91 jours pour les différents mélanges des BAP	62
Figure 1.34	L'effet du dosage de la cendre volante sur la profondeur de pénétration des ions chlore après 90 cycles de gel-dégel	63
Figure 1.35	Les valeurs de la perméabilité des bétons étudiés aux ions de chlore	63
Figure 1.36	Résultats d'absorption d'eau par capillarité des bétons étudiés	64
Figure 1.37	Coefficient d'absorption capillaire (à 24h) des bétons étudiés	65
Figure 1.38	Influence des cendres volantes sur la sorptivité	65
Figure 1.39	Profondeur de carbonatation des bétons étudiés ($t_0=28$ jours)	66
Figure 1.40	Profondeur de carbonatation des bétons étudiés à l'âge de 42,5 mois.....	67
Figure 1.41	Résistance résiduelle en compression après 90 cycles de gel-dégel	68
Figure 1.42	Résistance résiduelle en traction après 90 cycles de gel-dégel.....	68
Figure 2.1	Scories de la pouzzolane naturelle utilisée	72
Figure 2.2	Broyeur à boulets	73
Figure 2.3	Variation de la finesse de la PZN en fonction du temps de broyage.....	73
Figure 2.4	Distribution granulométrique des granulats	76
Figure 2.5	Séquence de malaxage du mortier	78

Figure 2.6	Malaxeur de mortier	78
Figure 2.7	Séquence de malaxage du BAP.....	80
Figure 2.8	Malaxeur de béton	80
Figure 2.9	Essai d'étalement pour mortier	81
Figure 2.10	Essai à l'entonnoir pour mortier	82
Figure 2.11	Essai au cône d'Abrams	83
Figure 2.12	Entonnoir en V (V-Funnel) pour les BAP	85
Figure 2.13	Essai à la boîte en L	87
Figure 2.14	Essai à la boîte en U	88
Figure 2.15	Les dimensions du J-Ring et les positions de mesure de différentes hauteurs.....	89
Figure 2.16	Mesure d'étalement en présence du J-Ring	90
Figure 2.17	Mesure des hauteurs à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring	91
Figure 2.18	Représentation du cas de ségrégation statique dans un volume de béton.....	91
Figure 2.19	Essai au tamis	92
Figure 2.20	Diagramme des essais réalisés sur mortier	93
Figure 2.21	Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état frais	94
Figure 3.1	Présence de ressuage dans le mortier pour des valeurs de SP/L de 2% et 2,2%.....	96

Figure 3.2	Variation d'étalement en fonction du dosage du superplastifiant	97
Figure 3.3	Variation du temps d'écoulement du mortier au V-Funnel en fonction du dosage du superplastifiant	97
Figure 3.4	Etalement en fonction de la teneur en PZN et sa finesse	100
Figure 3.5	Temps d'étalement en fonction de la teneur en PZN et sa finesse	101
Figure 3.6	Etalement avec et sans J-Ring en fonction de la teneur en PZN pour la finesse 3500 cm ² /g.....	108
Figure 3.7	Etalement avec et sans J-Ring en fonction de la teneur en PZN et sa finesse	108
Figure 3.8	Variation du T ₅₀ avec et sans J-Ring en fonction de la teneur en PZN pour la finesse 3500 cm ² /g	110
Figure 3.9	T ₅₀ avec J-Ring en fonction de la teneur en PZN et sa finesse	110
Figure 3.10	B _j en fonction de la teneur en PZN et sa finesse	112
Figure 3.11	T _{V-Funnel} en fonction de la teneur en PZN et sa finesse	114
Figure 3.12	Rapport H ₂ /H ₁ en fonction de la teneur en PZN et sa finesse	116
Figure 3.13	T ₂₀ en fonction de la teneur en PZN et sa finesse	118
Figure 3.14	T ₄₀ en fonction de la teneur en PZN et sa finesse	119
Figure 3.15	Laitance en fonction de la teneur en PZN et sa finesse	121
Figure 3.16	H _{Remplissage} au en fonction de la teneur en PZN et sa finesse	122

Liste des Tableaux :

Tableau 1.1	Résultats du coefficient de perméabilité à l'oxygène	59
Tableau 1.2	Résultats du coefficient de migration des ions chlore	61
Tableau 1.3	Résistance au gel en terme de perte de masse (kg/m^2)	69
Tableau 2.1	Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CEM I 42,5...	71
Tableau 2.2	Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment CEM I 42,5.....	72
Tableau 2.3	Analyse chimique et caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle.....	74
Tableau 2.4	Composition minéralogiques de la pouzzolane naturelle	74
Tableau 2.5	Caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle	75
Tableau 2.6	Caractéristiques des granulats	75
Tableau 2.7	Essais relatifs aux BAP.....	82
Tableau 2.8	Classification des BAP selon le domaine d'utilisation	84
Tableau 2.9	La classe de viscosité donnée par le temps T_{50}	84
Tableau 2.10	Classes de viscosité donnée par le temps T_{V-F}	86
Tableau 3.1	Composition des mortiers pour différentes valeurs de Sp/L	96
Tableau 3.2	Composition des BAP testés	99
Tableau 3.3	Valeurs de l'étalement au cône d'Abrams	99

Tableau 3.4	Valeurs de temps d'étalement T_{50} au cône d'Abrams	100
Tableau 3.5	Valeurs de l'étalement S_j au J-Ring	107
Tableau 3.6	Valeurs de Temps d'étalement T_{50j} au J-Ring	109
Tableau 3.7	Valeurs différence de hauteur B_j	111
Tableau 3.8	Valeurs de temps d'écoulement au V-Funnel ($T_{V-Funnel}$).....	113
Tableau 3.9	Valeurs du rapport H_2/H_1 de l'essai de L-Box	116
Tableau 3.10	Valeurs de temps d'écoulement T_{20} de l'essai de L-Box	118
Tableau 3.11	Valeurs de temps d'écoulement T_{40} de l'essai de L-Box	119
Tableau 3.12	Valeurs de la laitance des mélanges en %.....	120
Tableau 3.13	Valeurs de la Hauteur de remplissage à la boîte en U	122

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

A_{bG}	Coefficient d'absorption du gravier
A_{bs}	Coefficient d'absorption du sable
BAP	Béton autoplaçant
BHP	Béton de Haute Performance
B_J	Différence d'Hauteurs de béton au J-Ring
BLAP	Béton léger autoplaçant
BO	Béton ordinaire
BV	Béton Vibré
C	Ciment
C+A	Ciment+Addition
$Ca CO_3$	Carbonate de calcium
CEM I 42,5	Ciment Portland ordinaire de Classe 42,5
CEM II	Ciment Portland composé
CEM III	Ciment de haut-fourneau
CO_2	Dioxyde de carbone
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
CV	Cendres volantes
C_{vol}	Le pourcentage en volume du ciment, (%)
D_{max}	Diamètre maximal des Granulats
E	Eau
$E/(C+A)$	Eau / (Ciment+Addition)

E/C	Eau/Ciment
E/L	Eau/Liant
E_{eff}	La quantité d'eau efficace, (kg)
E_{vol}	Le pourcentage d'eau en volume, (%)
F/L	Filler calcaire/liant
FA	Fly ash
G	Gravier
G/S	Gravier/Sable
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LF/C	Limestone fillers / cement
MBE	Mortier de Béton Equivalent
MK	Métakaolin
MOR	Mortier
NC	Normal Concrete
PC	Polycarboxylate
PZN	Pouzzolane naturelle
REF	Référence
RHZ	Cendres de riz
R_m	Vitesse relative
S/M	Sable/Mortier
SCC	Self-Compacting Concrete
SF	Slump flow

SP	Superplastifiant
SP/L	Superplastifiant/Liant
SP/P	Superplastifiant/Poudre
SSB	Surface Spécifique de Blaine
T_{20}	Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 20 cm, (sec).
T_{40}	Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 40 cm, (sec).
T_{50}	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm, (sec).
T_{V-F}	Temps d'écoulement à l'entonnoir, (sec).
V	Volume, (m^3)
VC	Vibrated concrete
VF	Viscosity Funnel
V_p	Volume de poudre, (m^3).ΓΓΓ
VS	Viscosity Slump
$V_{\text{sable}}/V_{\text{mortier}}$	Volume du sable / volume du mortier
V_w	Volume d'eau, (m^3).
w/p	Water / powder
W_{eff}	Eau efficace
W_{eff}/C	Eau efficace / ciment
wt	weight
γ	Le taux de cisaillement, (s^{-1})

Γ_m	Etatement relatif
η	La viscosité, (Pa.s ⁻¹)
η_P	la viscosité plastique, (Pa.s ⁻¹)
ρ_{abs}	Masse volumique absolue, (Kg/m ³)
ρ_{app}	Masse volumique apparente, (Kg/m ³)
ρ_C	Masse volumique du ciment, (Kg/m ³)
ρ_E	Masse volumique d'eau, (Kg/m ³)
ρ_G	Masse apparente du gravier, (Kg/m ³)
ρ_S	Masse volumique du sable, (Kg/m ³)
ρ_{SP}	Masse volumique du superplastifiant, (Kg/m ³)
τ	Contrainte de cisaillement, (Pa)
τ_0	Seuil de cisaillement, (Pa)
Π	Pourcentage de laitance, (%)
%P	Le pourcentage du volume de pate dans le ciment, (%)
μ_G	L'humidité du gravier, (%)
μ_S	L'humidité du sable, (%)

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement le béton est l'un des matériaux le plus employé dans le domaine du bâtiment ou de génie civil à travers le monde. En effet sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité, sa tenue au feu et son faible coût, contribue à accroître son utilisation. Toutefois, le matériau béton doit s'adapté de manière continue à de nouvelles exigences et nouveaux besoins.

Afin d'adapter les bétons à des ouvrages d'une forme architecturale complexe (formes variable et courbures multiples) ou caractérisés par une forte concentration en armature, ou même de réduire les nuisances sonore dues à l'utilisation de vibration au moment du coulage du béton, une étape supplémentaire est franchie avec les bétons autoplaçants (BAP) dont les performances couvrant ainsi celles des bétons ordinaire et de haute performance.

L'idée de création des BAP a été lancée vers le milieu des années 80 par les chercheurs de l'université de Tokyo, puis a été repris rapidement par les grands groupes industriels Japonais pour des projets d'envergure. Malgré qu'une vingtaine d'années ont passées après son développement, les BAP sont encore à l'heure actuelle qualifiés de nouveaux béton car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement. Ces bétons sont élaborés selon une formulation spécifique : fort dosage en sable et en éléments fins (filler, laitier ou cendres volantes), emploi de superplastifiants et éventuellement d'un agent colloïdal qui permet d'assurer l'homogénéité du mélange.les BAP doivent être très fluide tout en conservant une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires peuvent être obtenues par l'emploi des superplastifiants à un dosage optimal et un dosage élevé en ciment qui le caractérise par rapport aux bétons ordinaires. Cependant, les superplastifiants peuvent augmenter les risques de ségrégation et de sédimentation dans le béton. Le fait de leur associer des agents de viscosité aide à maintenir les granulats en suspension et permet au béton de garder un squelette granulaire bien réparti dans tout le volume.

Malgré les avantages pratiques des BAP, leur point faible réside dans leur coût qui est relativement plus élevé que les bétons ordinaires en raison de l'emploi du superplastifiant et un dosage important en ciment, limitant ainsi son utilisation.

L'utilisation des additions minérales comme le laitier, la PZN et le calcaire en tant que substitution du ciment peut garantir deux principaux avantages, la première réside sur le fait que certaines additions ont le même effet que le superplastifiant dans l'amélioration de la fluidité, et d'autre ils ont le même effet que les agents viscosant dans l'augmentation de la viscosité du mélange, ce qui réduit de manière significatif le cout globale du matériau. Le deuxième avantage réside dans le fait que l'utilisation de ces additions présentent une façon efficace pour l'industrie du ciment de diminuer ses émissions de CO₂, qui représentent 5% du total des émissions anthropiques dans le monde.

En effet, notre travail s'inscrit dans le contexte de formuler un BAP économique, afin de valoriser l'utilisation de la pouzzolane naturelle de l'ouest Algérien. Ceci passe par une étude de l'influence du dosage de la pouzzolane naturelle ainsi que sa finesse sur le comportement rhéologique du BAP. Afin d'atteindre les objectifs cités, le mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur le béton autoplaçant, notamment les différents aspects de caractérisation de leurs propriétés intrinsèques tels que, la formulation, les propriétés mécaniques et la durabilité.

Le deuxième chapitre a été consacré aux caractéristiques des matériaux utilisés et les formulations qui ont été adoptées pour réaliser le travail expérimental dans le cadre de cette étude. Ensuite, nous exposons aussi les différents essais caractérisant le BAP à l'état frais.

Le chapitre trois est consacré à l'analyse et la discussion des résultats des différents essais réalisés.

Enfin une conclusion générale ainsi que des recommandations sont données pour futurs travaux.

CHAPITRE 1

LE BÉTON AUTO-PLAÇANT – SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Généralités

Dans ce chapitre, on présente une synthèse bibliographique sur le Béton Auto-plaçant (BAP). Cette partie analyse les concepts de formulation des bétons auto-plaçants, de leur caractérisation rhéologique à l'état frais, de leurs propriétés mécaniques à l'état durci, ainsi que certains indicateurs de durabilité.

1.2 Définition et historique

Le béton auto-plaçant est un béton très fluide, stable et homogène. Il se distingue des bétons ordinaires (BO) par ses propriétés à l'état frais et sa capacité de moulage, d'enrobage et de compaction par le seul effet gravitaire. Les BAP ont été développées la première fois au Japon en 1988 en raison de la nécessité d'utiliser des matériaux auto-compactants et durable sans avoir recours à la vibration [1].

1.3 Avantages techniques et socio-économiques

Les avantages liés à l'utilisation du BAP sont multiples. Il permet une mise en œuvre sans vibration, un allongement des temps d'ouvrabilité, un bétonnage plus rapide et optimisation de productivité sur chantier, un coulage des murs verticaux de grande hauteur et des formes complexe et fortement ferraillées et une amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers.

En plus de ces avantages techniques, le BAP offre des avantages socio-économiques comme l'amélioration des conditions de travail sur le chantier, l'absence de nuisance sonore liée à la vibration, et la réduction du coût de la main d'œuvre.

1.4 Matériaux constituant le BAP

Les constituants des bétons ordinaires sont ceux utilisés pour le confectionnement des BAP. En plus, d'autres matériaux sont ajoutés tels que les superplastifiants afin d'assurer une meilleure fluidité et les fillers ou les ajouts minéraux.

1.4.1 Le ciment

Tout type de ciment peut être employé pour la formulation d'un BAP. Le choix correct du type de ciment est généralement dicté par les exigences spécifiques de chaque application ou ce qui est actuellement utilisé par le producteur plutôt que les exigences spécifiques du BAP [2].

1.4.2 Les additions minérales

La plupart des ajouts minéraux sont des sous produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple). Ainsi l'incorporation des ajouts minéraux à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton et la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, et par conséquent l'émission du CO₂ de l'industrie cimentière dans la nature.

Le rôle d'un ajout cimentaire est d'améliorer les caractéristiques du matériau à l'état frais, pour faciliter sa mise en œuvre, ou à l'état durci pour augmenter sa résistance et sa durabilité. L'emploi de ces ajouts permet de réduire la chaleur d'hydratation de ciment et aussi de fournir la viscosité désirée [3]. Toutefois, les ajouts minéraux substituant le ciment peuvent être classés sur la base de la source de chaque produit d'où on trouve :

- *Les produits artificiels* : Désignés par le laitier des hauts fourneaux, les cendres volantes, la fumée de silice, l'argile calcinée (méta kaolin), les déchets d'incinération et les déchets de briques concassées.
- *Les produits naturels* : Définis par la pouzzolane naturelle (cendre volcaniques, scories), le calcaire, l'argile opaline et les additions siliceuses (sable).

1.4.3 Les granulats

Selon leurs propriétés, les granulats influent sur la résistance, la durabilité et la performance structurale du béton [4]. La forme et la rugosité des granulats ont une grande influence sur la compacité du mélange granulaire, qui est également sensible à la granulométrie (distribution de taille des granulats utilisés dans un béton donné). Les granulats peuvent être naturels, artificiels ou concassés.

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés, sauf que l'utilisation des granulats roulés est plus favorable du fait de leur contribution dans la limitation des risques de ségrégation. Cependant, la granularité et la compacité du squelette granulaire sec, ont une influence sur le comportement du béton frais. C-à-d qu'elles permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée, ce qui conduit à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP [5]. Afin d'aboutir à un bon BAP, le volume du gravier et la taille maximale des granulats ont été limités pour réduire les frictions et éviter les blocages dans des zones confinées. Il est donc conseillé que le diamètre maximale D_{\max} des granulats varie entre 16 et 20 mm [6].

La quantité de sable contenue dans le mortier doit également être contrôlée. Des essais montrent que pour un rapport $V_{sable}/V_{mortier}$ supérieur à 50%, la capacité de remplissage, mesurée à la U-Box, diminue nettement. Moins il y a d'interaction entre les particules, plus le béton s'écoule facilement quelle que soit la configuration d'essai [7].

1.4.4 Eau de gâchage

Nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours.

1.4.5 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5 % du poids de ciment

provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci à l'état frais et / ou durci [8]. Toute formulation des BAP fait appelle à des superplastifiants pour obtenir la fluidité souhaitée, et quelques fois des agents de viscosité pour maîtriser la ségrégation et le ressuage.

Les superplastifiants sont des formes avancées de plastifiants dont l'efficacité est plus élevée, elles peuvent être introduites en plus grande quantité dans le béton que les plastifiants sans créer des effets secondaires (effet retardateur excessif, entrainement d'air). En général, les superplastifiants utilisés dans les formulations des BAP sont du type polyméamine sulfoné, polycarboxylate ou de naphthalène sulfonate [9]. Les molécules du superplastifiant s'adsorbent à la surface des particules du liant leur conférant des charges électrostatiques négatives (Figure 1.1). De cette façon, les particules de liant se repoussent et sont mieux défloculées. Cette amélioration considérable de la dispersion des grains de liant réduit la viscosité de la pâte, augmentant ainsi la fluidité des coulis et des bétons (Fig. 1.2). De plus, les molécules adsorbées aident à contrôler le taux d'hydratation du ciment de façon à maintenir une fluidité optimale dans le temps. Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles [10].

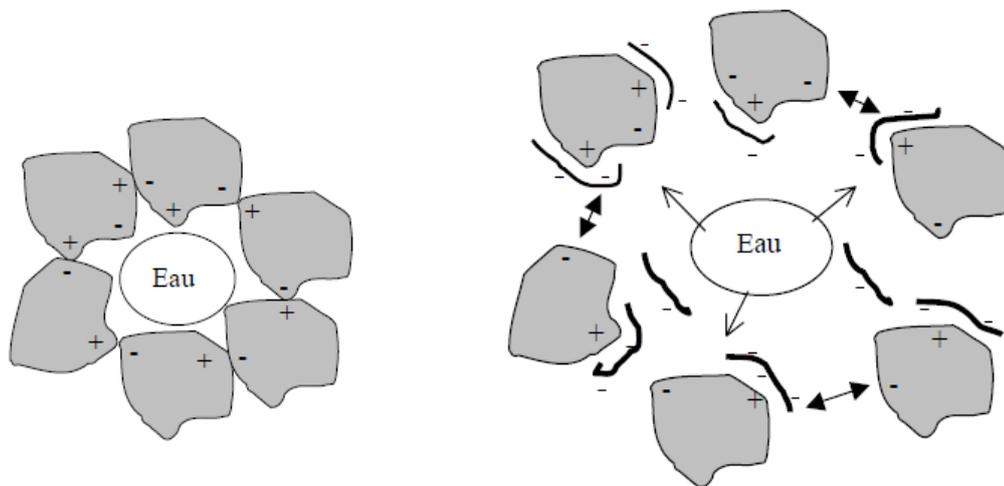


Figure 1.1 : Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment.

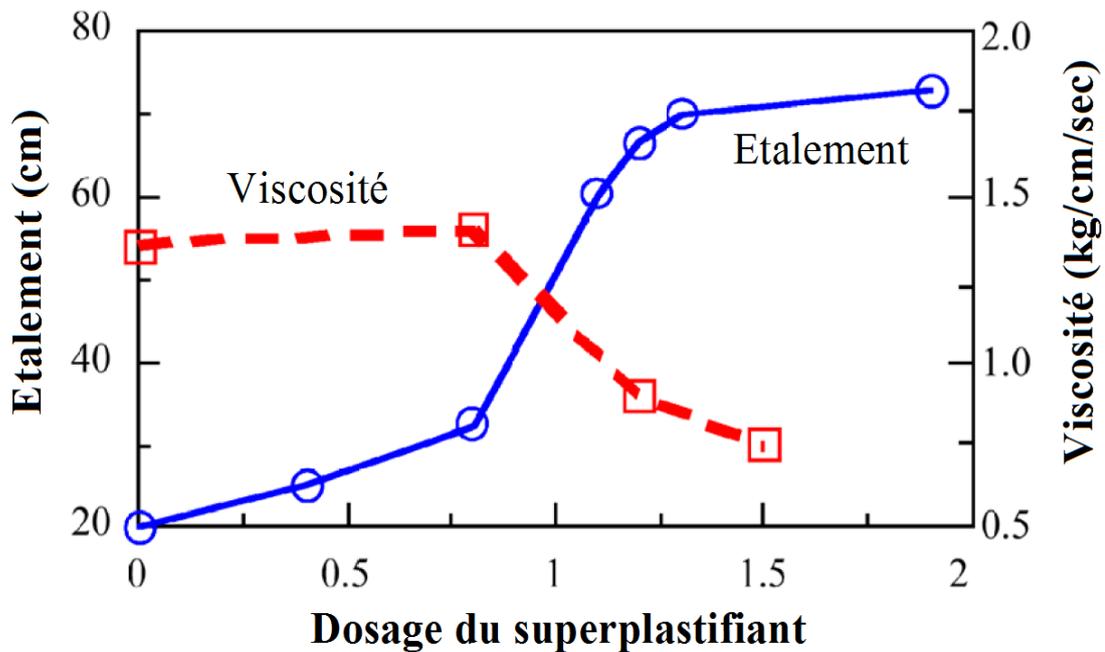


Figure 1.2 : Influence de dosage de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [11].

Les agents viscosant sont des hypocycloïdes extraits dans les produits naturels qui ont pour rôle d'empêcher le ressuage lié à la séparation des phases entre solides et liquides, et de limiter les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse [9]. Les agents de viscosité permettent un maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps estimé à environ une heure [12].

1.5 Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique.

La rhéologie donne les relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume, en tenant éventuellement compte de leur histoire et des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps.

Les fluides tels que l'eau, l'huile se comportent comme des fluides newtoniens, où la contrainte de cisaillement est directement proportionnelle au taux de cisaillement γ . Cette relation est exprimée par l'équation (1.1) [13].

$$\tau = \eta \gamma \quad (1.1)$$

Avec : τ la contrainte de cisaillement (Pa), η la viscosité ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) et γ taux de cisaillement (s^{-1}).

Contrairement aux fluides newtoniens les bétons ordinaires et aussi les BAP commencent à s'écouler seulement si la contrainte de cisaillement dépasse la contrainte élastique τ_0 [13]. La pâte de ciment, mortier et béton peuvent être décrits comme des suspensions viscoplastiques. Cela veut dire qu'au-dessous d'une valeur de la contrainte critique (c.-à-d. le seuil de cisaillement), la matière se comporte comme un solide mais s'écoule comme un liquide visqueux, quand cette contrainte est dépassé ($\tau > \tau_0$). Le type le plus simple de ce comportement est le comportement linéaire du fluide de Bingham (Fig. 1.3).

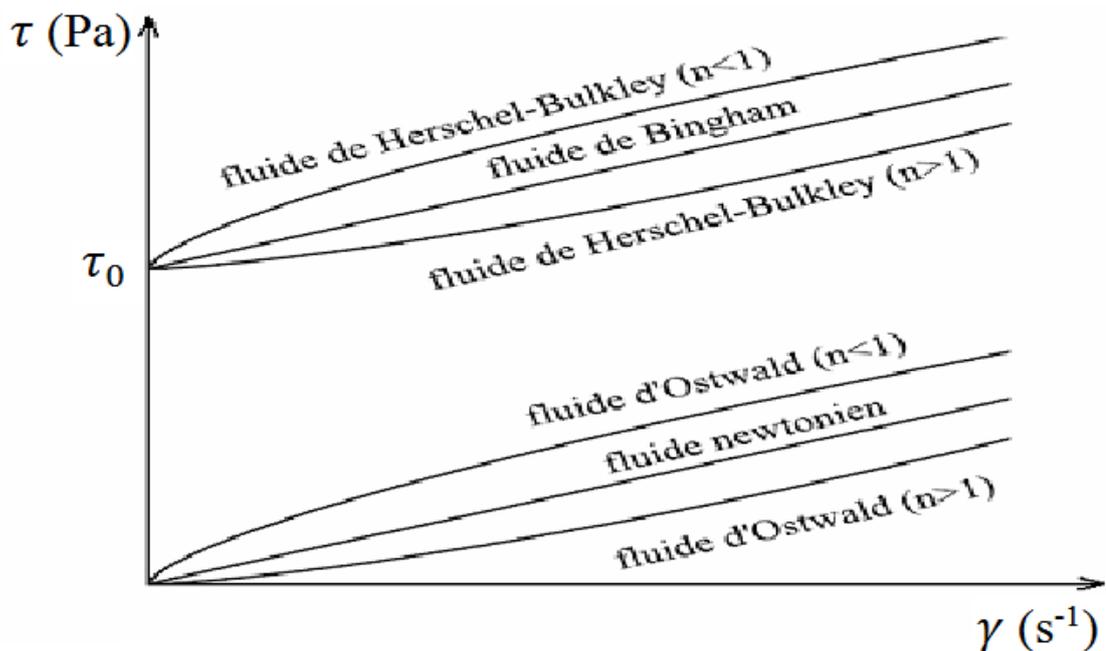


Figure 1.3 : Différents Comportements d'écoulement des fluides [14].

Le comportement rhéologique d'un matériau (Figure 1.4) est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement, τ_0 .

Le fluide est considéré comme *Binghamien* si la courbe d'écoulement est une droite, qui a pour équation :

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \gamma \quad (1.2)$$

Avec τ la contrainte de cisaillement (Pa), τ_0 le seuil de cisaillement (Pa), η_p la viscosité plastique (Pa.s) et γ la vitesse de déformation (s^{-1}).

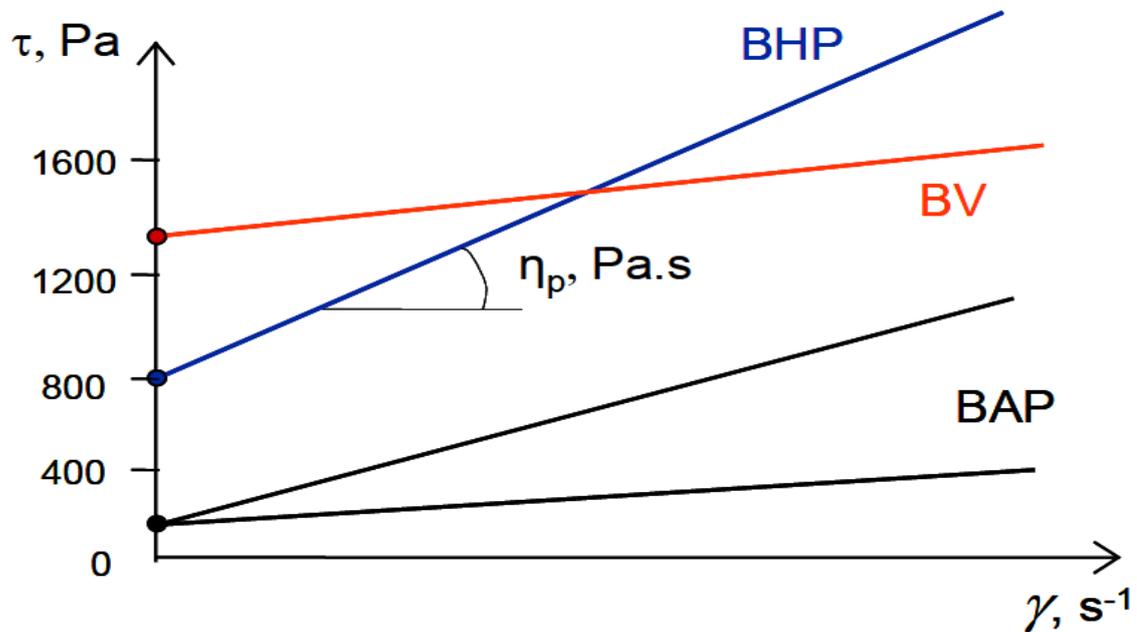


Figure 1.4 : Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton [5].

Le seuil de cisaillement est la somme macroscopique de frottements internes des grains solides. Il dépend directement du nombre et de la nature des contacts entre les grains et donc de la compacité du squelette granulaire. Au-delà du seuil, la contrainte appliquée au mélange entraîne l'écoulement qui se traduit par des mouvements relatifs entre les grains solides (le frottement) et la circulation de la phase liquide dans la porosité inter-grains.

C'est cette dernière qui causerait la dissipation visqueuse dans le liquide en écoulement et expliquerait le deuxième terme $\eta_P \dot{\gamma}$ dans la loi de Bingham. Plus la circulation est difficile, plus le paramètre η_P est important (Figure 1.5).

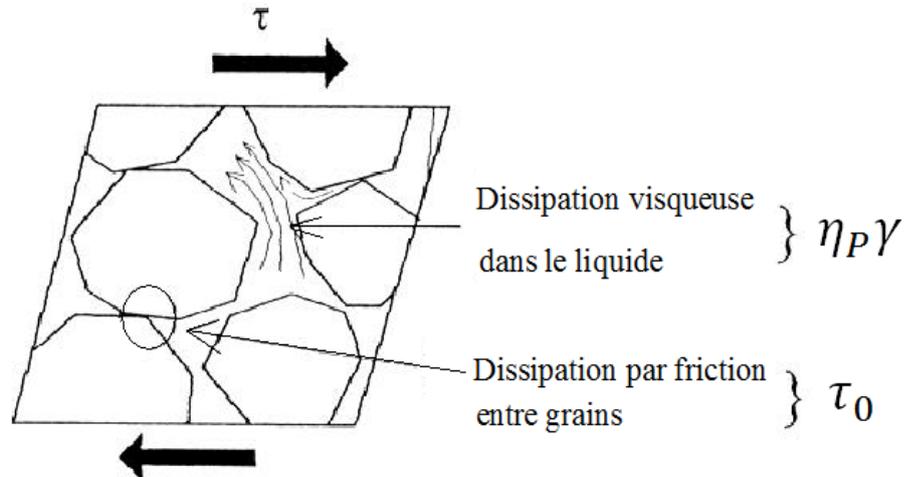


Figure 1.5 : Interprétation physique du modèle de Bingham [15].

Pour les bétons autoplaçants, l'équation de comportement selon le modèle de *Herschel-Bulkley* dont l'équation de comportement est la suivante a été proposée [16]:

$$\tau = \tau_0 + a\dot{\gamma}^b \quad (1.3)$$

Où a et b sont des constantes de comportement.

Ces grandeurs (seuil de cisaillement, viscosité plastique) permettant de définir le comportement d'un béton lors de sa mise en place sont quantifiables à l'aide d'un rhéomètre.

1.6 Formulation des bétons autoplaçants

1.6.1 Particularité de la composition des BAP

Les BAP se caractérisent par un volume de pâte (ciment + addition + adjuvants + eau efficace + air) élevé, l'utilisation de superplastifiants, quantités de fines élevée, et un faible volume de gravier (Fig. 1.6).

Les BAP contiennent un volume de pâte important, typiquement de 330 à 400 l/m³, dont le rôle est d'écartier les granulats les uns des autres. Le volume de pâte dans un BAP représente 35 à 45% du volume totale, alors que dans un béton traditionnel il est de 20 à 35 % [17].

Pour leur assurer une maniabilité suffisante, tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m³) supérieure à celle des bétons conventionnels. Ces fines proviennent du ciment, des additions et des granulats. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, le liant est souvent un composé binaire, voire ternaire : ciment Portland mélangé avec cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc.

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinées, il faut en limiter le volume. D'une autre côté, la présence de gravillon permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP.

En plus, le diamètre maximal D_{\max} des gravillons dans un BAP est compris entre 10 mm et 20 mm. Les risques de blocage, pour un confinement donné, augmentent lorsque D_{\max} augmente, ce qui conduit à diminuer le volume de gravillon. Le choix d'un D_{\max} plus important est donc possible, mais ne se justifie que lorsque le confinement est faible.

Les BAP contiennent des superplastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée. Toutefois un dosage trop élevé peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

L'utilisation d'agents de cohésion est recommandée dans les BAP ayant des rapports eau/fines élevés pour les rendre moins sensibles à des variations d'eau vis-à-vis du problème du ressuage et de la ségrégation.

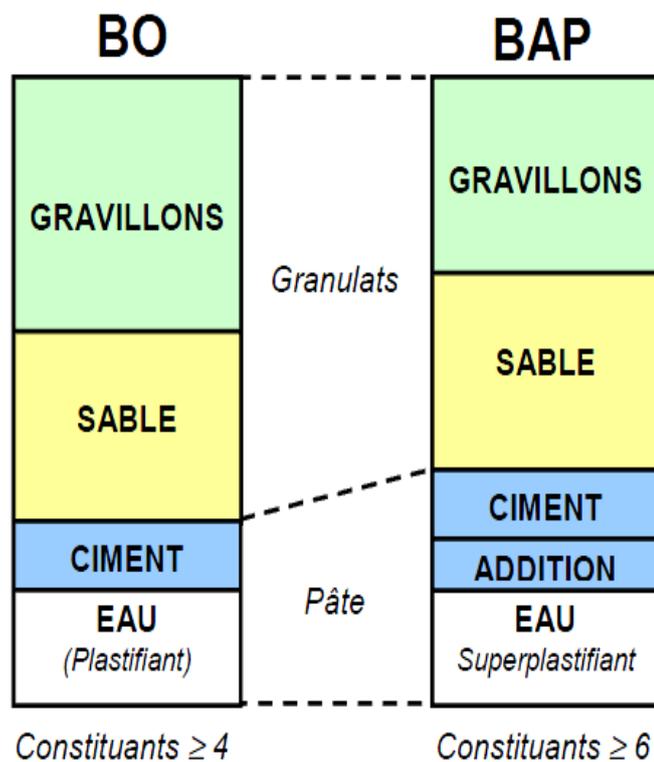


Figure 1.6 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP [1].

1.6.2 Les approches de formulations

Plusieurs approches de formulations des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche Japonaise, approche Suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

i. Optimisation des mortiers

Okamura et Ozawa [18] sont les deux premiers chercheurs qui ont mis en point une méthode de formulation des BAP. Les caractéristiques visées pour aboutir à un béton autocompactant sont une capacité de déformation élevée de la pâte et du mortier, ainsi qu'une résistance du BAP à la ségrégation lors de l'écoulement en milieu confiné.

La méthode se base sur les critères suivants [1] :

- Une quantité de gravillons limitée ;
- Un rapport eau/poudre faible ;
- Utilisation d'un superplastifiant.

Le principe consiste à fixer le dosage des deux constituants sable et gravier. Le dosage en gravier est fixé à 50% de volume de solide dans le but de réduire l'interaction entre les particules de gravier lors de la déformation du béton, et par conséquent minimiser les risques de blocage. La quantité de sable est par ailleurs limitée à 40% du volume du mortier afin d'assurer une bonne ouvrabilité. Il est important de noter que les auteurs excluent du terme sable toutes les fines inférieures à 0,09 mm [19], qui sont considérées comme poudre au même titre que les liants. Le rapport E/L (en volume) est supposé variant entre 0,9 et 1 selon les propriétés de liant [1].

L'optimisation de la pâte (rapport eau/poudre et quantité de superplastifiant) s'effectue sur des mortiers dont la teneur volumique en sable est égale à 40 %. Ces mortiers sont caractérisés conjointement par un essai d'étalement au cône et un essai d'écoulement à l'entonnoir.

Deux grandeurs adimensionnelles sont déterminées à partir des essais de caractérisation du mortier ; l'étalement relatif Γ_m et La vitesse relative d'écoulement R_m :

$$\Gamma_m = \frac{(d_1 d_2 - d_0^2)}{d_0^2} \quad (1.4)$$

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (1.5)$$

Avec d_i (en mm) est le diamètre final de la galette de mortier, d_0 est le diamètre inférieur du cône (100 mm) et t (en s) le temps d'écoulement à l'entonnoir (Figure 1.7).

Pour obtenir un béton autoplaçant acceptable il faut avoir simultanément $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1$.

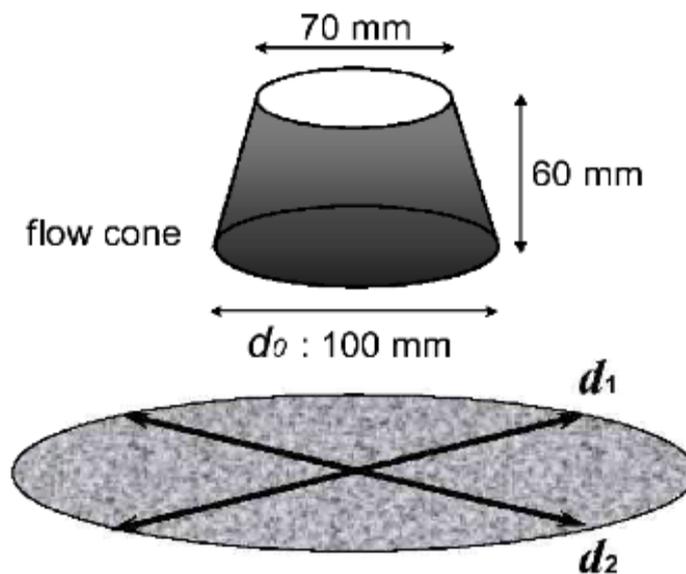


Figure 1.7 : Essai d'étalement au cône.

D'un point de vue pratique, l'expérience montre qu'il y a une relation linéaire entre Γ_m et R_m , pour un dosage en superplastifiant donné et pour différents rapports volumiques eau sur poudre (Figure 1.8).

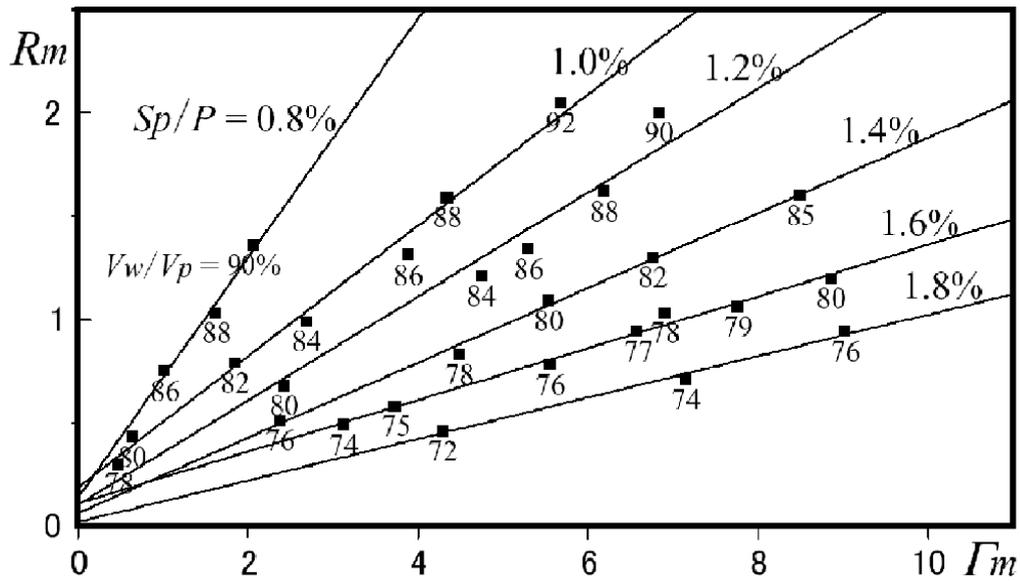


Figure 1.8 : Relation entre les termes Γ_m et R_m pour différents dosages en superplastifiants (S_p/P) et différents rapports volumiques eau sur poudre (V_w/V_p) [1].

ii. Optimisation du volume de pâte

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant.

La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage (Fig. 1.9).

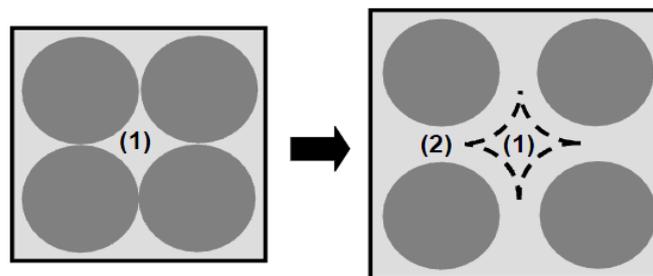


Figure 1.9 : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2) [20].

Des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, sont proposées. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton.

D'autres approches similaires du dosage de la pâte sont aussi proposées, basées soit sur : un volume de pâte minimal vis-à-vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis-à-vis du blocage, soit sur la notion d'excès de pâte.

iii. Optimisation du squelette granulaire

Cette méthode se base sur l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Si on considère sur la figure 1.9 que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange.

Sedran et De Larrard [19] ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

iv. Approche basée sur un plan d'expérience

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressant pour connaître l'effet des paramètres de composition. Khayat et al. [21] ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse du liant (C+A), le rapport eau sur fines $E/(C+A)$, la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs ont pu obtenir l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs.

v. Approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE

Le principe de la méthode Mortier de Béton Equivalent (MBE) est basé sur le fait qu'il existe une corrélation simple reliant les propriétés rhéologiques d'un béton au mortier qui le compose [22]. Cependant, le mortier qui joue un rôle sur la rhéologie du béton n'est pas directement le mortier déduit du béton. En effet, dans un béton, une partie de la pâte et des grains de sable adhère aux gravillons et ne participe pas à la rhéologie. Le MBE est le nom donné au mortier qui participe à la rhéologie. Il peut être obtenu expérimentalement en tamisant le béton frais au tamis de 5 mm. La composition du MBE qui conduit aux mêmes propriétés rhéologiques que celle du mortier tamisé est déduite de celle du mortier du béton en corrigeant la quantité de sable de manière à ce que la surface granulaire du MBE soit la même que celle du béton.

1.7 Propriétés mécaniques du béton durci

Le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie (matrice) et les granulats (inclusion). Les propriétés de ce mélange (résistance, module d'élasticité, retrait, fluage) dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait.

1.7.1 Résistance à la compression

Plusieurs travaux [9, 23, 24] ont été réalisés pour comparer les caractéristiques mécaniques des BAP contenant des fillers calcaires à celle des bétons vibrés (BV). Une accélération de la résistance au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours a été observée (Figure 1.10). Ce gain de résistance est due à l'action des fillers de calcaires qui agissent comme des sites de nucléation en plus le CaCO_3 s'incorpore partiellement dans la phase C-S-H [4], ce qui améliore l'hydratation du ciment. Cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler est grande (Figure 1.11) [25].

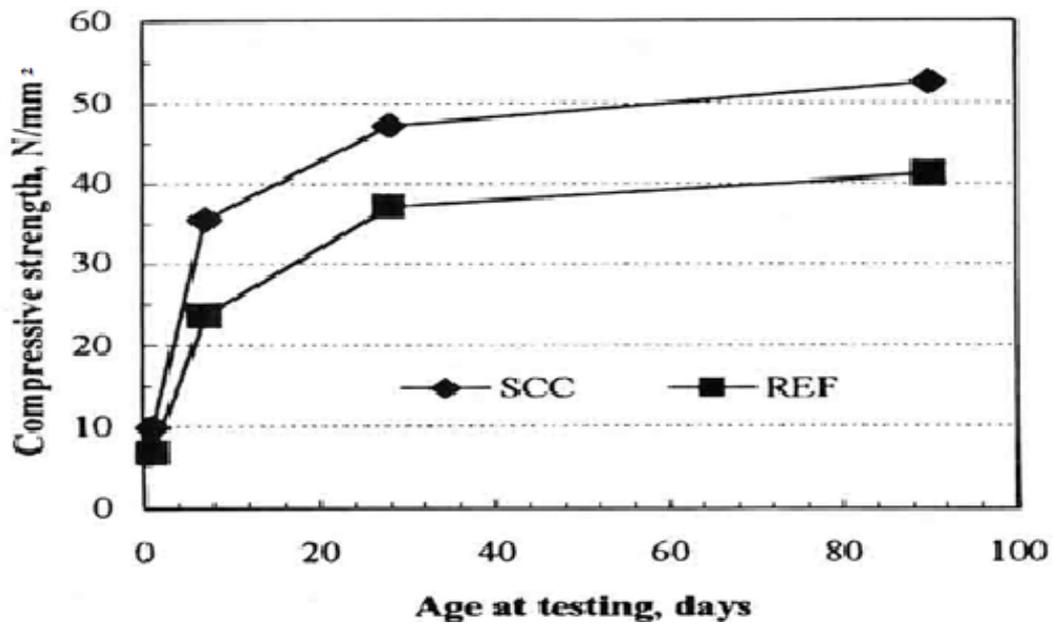


Figure 1.10 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant [26].

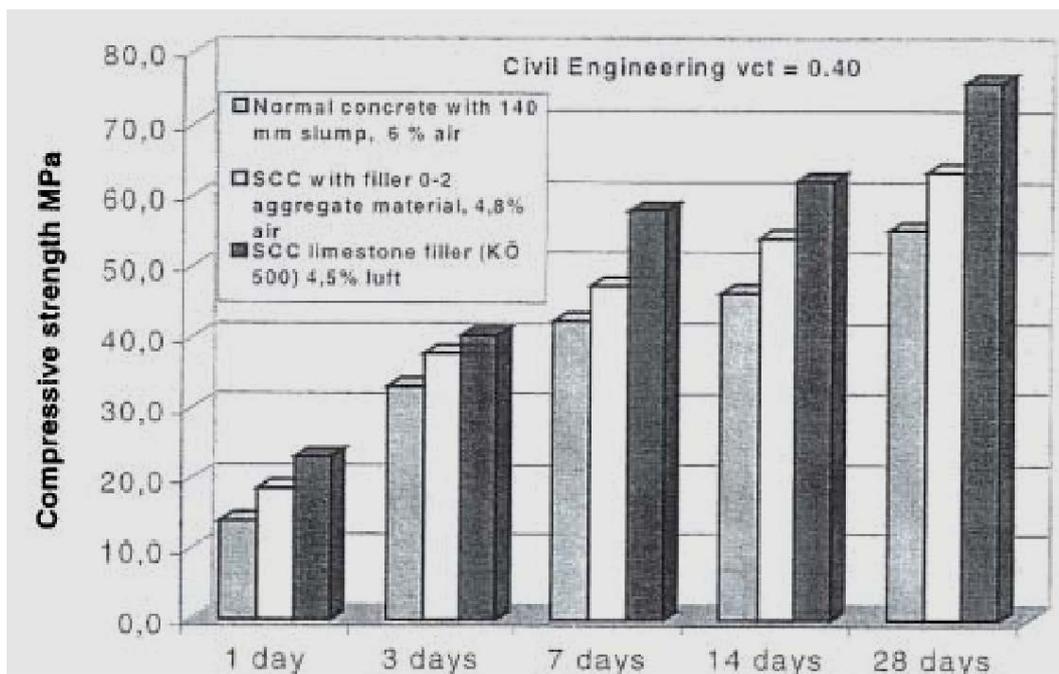


Figure 1.11 : Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP (de formulation différente) [25].

BENSEBTI [9] a rapporté une chute de résistance à la compression de 19% à 7 jours, de 23% à 14 jours et de 27% à 28 jours lorsque le pourcentage de filler calcaire augmente de 17 à 33% (Figure 1.12).

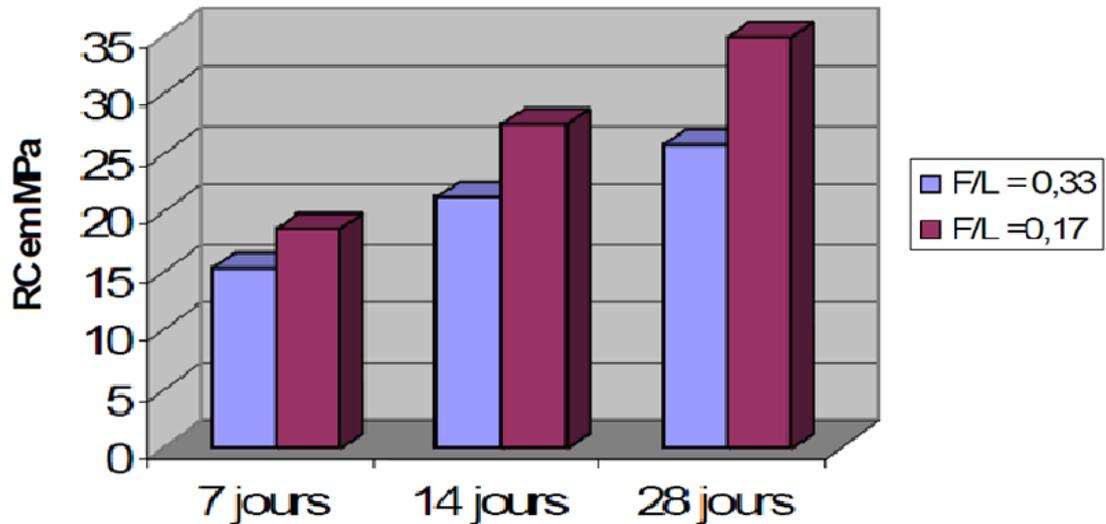


Figure 1.12 : Influence du rapport F/L sur la résistance à la compression [9].

Domone [27] a analysé 70 études sur les propriétés mécaniques des BAP à l'état durci et les à comparer avec les propriétés des BV à des résistances équivalentes. Les conclusions de son étude concernant la résistance à la compression sont :

- La différence de résistance entre les mélanges incluant des graviers concassés ou non concassé (roulé) est faible entre un BAP et un BV.
- Le rapport résistance cylindre sur résistance cube correspondant au BAP varie de 0,8 pour des résistances de 30 MPa à presque 1 pour des résistances de 90 MPa.

Felekoglu et al. [28] ont étudié l'effet du rapport E/C sur la résistance à la compression des BAP à 1, 7, 28 jours (Figure 1.13). Ils ont montré le développement rapide de la résistance lorsque le rapport E/C diminue.

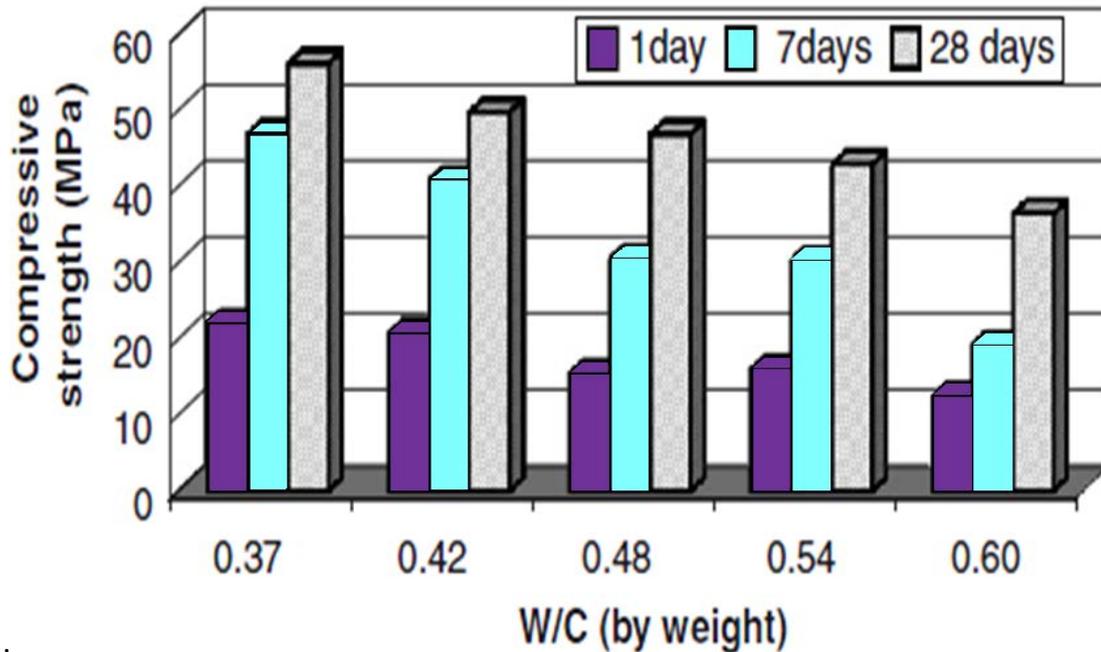


Figure 1.13 : Développement de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C [28].

Eva et al. [29] ont étudié l'influence d'incorporation de la cendre volante et des fillers calcaire sur les propriétés mécaniques et thermiques des BAP. Ils ont conclu que l'évolution de la résistance dès le premier jour d'âge des BAP incorporant des fillers de calcaire est plus rapide que celle observées dans les BAP contenant de la cendre volante, les deux bétons atteignent la même valeur de résistance à 90 jours d'âge. Le faible gain de résistance observé à court terme dans les BAP incorporant des cendres volantes est dû sa composition chimique qui comporte une teneur élevée en SiO_2 (52,77%).

Yazici [30] a étudié l'effet de la fumée de silice et le volume élevé en cendres volantes de classe C sur les propriétés mécanique des BAP. Les résultats de cette étude ont montré que la substitution du ciment par les cendres volantes de classe C fait diminuer la résistance à la compression à court et à long terme, et que cette diminution augmente avec l'augmentation du dosage en cendres volantes. La substitution du 10% de ciment par la fumée de silice influe positivement sur la résistance à la compression des BAP incorporant de la cendre volante de classe C à des différents teneurs et à des différents d'âges.

Sahmaran et al. [31] ont montré que la substitution du ciment Portland par les cendres volantes de 60% à 70% provoque des réductions considérables dans la valeur de la résistance à la compression d'environ 70% à jeune âge. Ces réductions ont été partiellement compensées après 28 jours d'âge. Selon l'auteur, la production des BAP avec des résistances à la compression qui varient de 33 à 40 MPa est possible avec l'incorporation des volumes élevés de cendres volantes.

D'autres chercheurs [32] ont montré que le volume de pâte a un effet limité sur la résistance à la compression. Une diminution de 12% de la résistance pour une augmentation de 57% du volume de pâte a été observée. Krachai et al. [33] ont remarqué que la substitution du ciment CEM II par la pouzzolane naturel engendre une diminution de résistance à la compression de 18% à 28 jour par rapport au béton témoin, mais au-delà de 90 jours cet écart décroît vers 5,1%. Le pourcentage optimal de la pouzzolane naturelle donnant de faible écart par rapport au béton témoin est de 15%.

1.7.2 Module d'élasticité

Le module d'élasticité dépend à la fois des proportions et des modules des différentes phases constituant le béton. Or, un BAP est composé d'un volume de pâte important et de rapport G/S plus faible qu'un BV. Par conséquent, les BAP ont un faible module d'élasticité que celui des BV, en raison du faible quantité du gravier et au volume élevé de la pâte.

Domone [27] a montré que le module d'élasticité des BAP peut être jusqu'à 40% plus faible que celui correspondant aux BV et cela à des faible valeurs de résistance en compression (≈ 20 MPa) (Figure 1.14), mais cette différence décroît jusqu'au moins de 5% à des valeurs de résistance élevé (90 – 100 MPa).

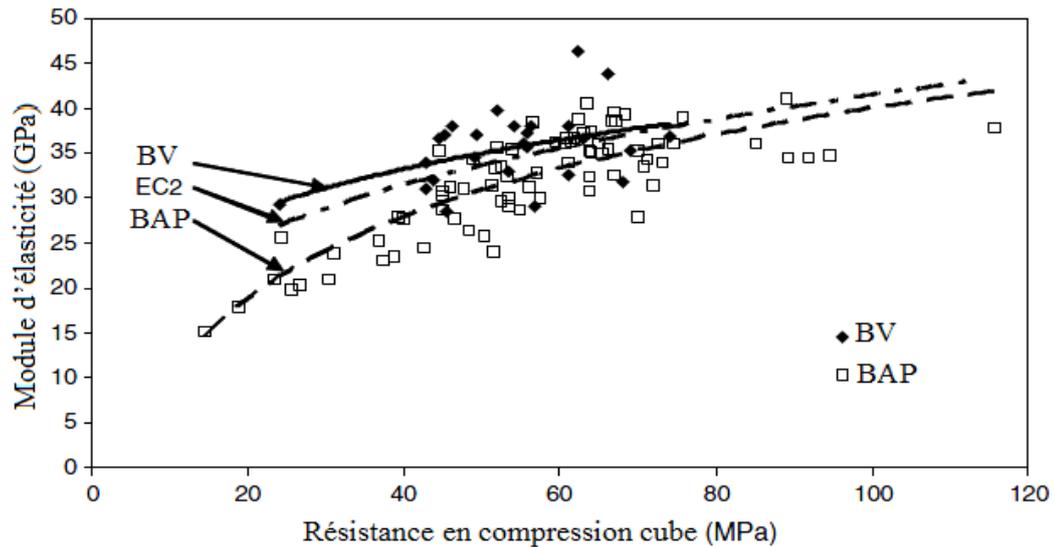


Figure 1.14: Variation du module d'élasticité en fonction de la résistance en compression [27].

Turcry et al. [32] ont montré une diminution du module des BAP avec l'augmentation du volume de pâte. Mais, selon ces mêmes auteurs, l'influence du volume sur le module est négligeable.

Topcu et Uygunoglu [34] ont montré que le module augmente avec l'augmentation du rapport E/L et que l'utilisation des granulats légers dans les BAP génère une diminution de la valeur du module (Fig. 1.15).

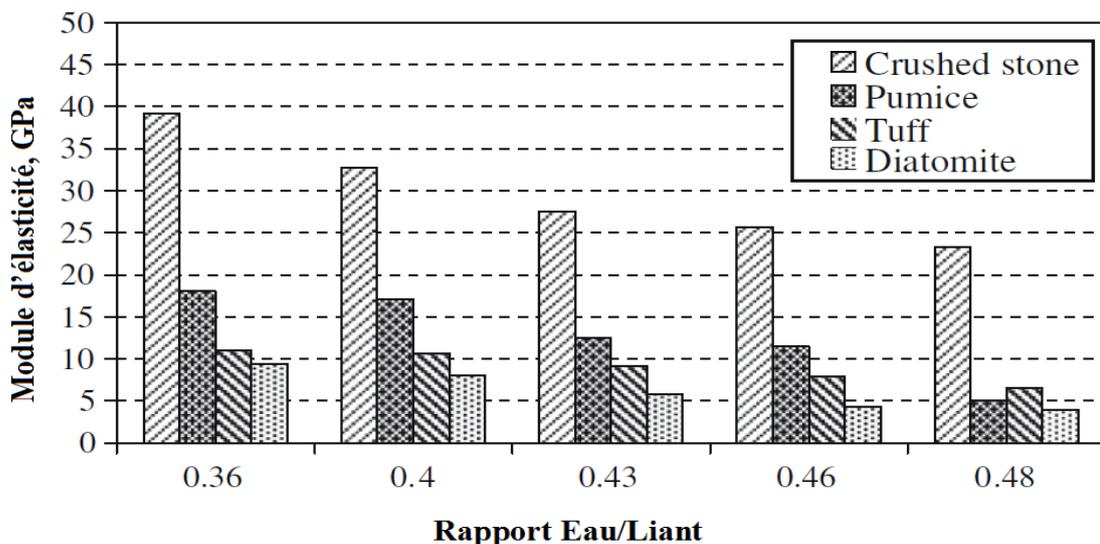


Figure 1.15 : Comparaison des modules d'élasticité des BAP et béton léger auto-plaçants (BLAP) [34].

Contrairement aux résultats trouvés précédemment, d'autres auteurs [28] ont remarqué que le module d'élasticité des BAP est similaire à celui des BV lorsque la résistance à la compression est similaire.

1.7.3 Résistance à la traction

La résistance à la traction est liée à la résistance à la compression, bien que cette relation dépend de multiples facteurs, tel que par exemple, le type de granulat et sa granulométrie, l'âge de béton, le processus de séchage et le volume d'air incluse [35].

La particularité des BAP peut entraîner des variations de résistance. Par exemple, la quantité des fines ou bien le volume de sable peuvent influencer la résistance à la traction [36]. En effet, la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition influence aussi la résistance à la traction.

La résistance à la traction des BAP incorporant des fillers de calcaire est d'environ 15% plus faible que celle des BV [35]. En plus, cette résistance ne suit pas le même chemin dans les deux types du béton, à 7 jours la différence entre les deux est faible, dans une moyenne de 3% (Figure 1.16), et a tendance de disparaître lorsque le dosage des fines de calcaire dans les BAP est élevé. A long terme, 28 et 90 jours d'âge, la différence est de l'ordre de 15% (Fig. 1.17).

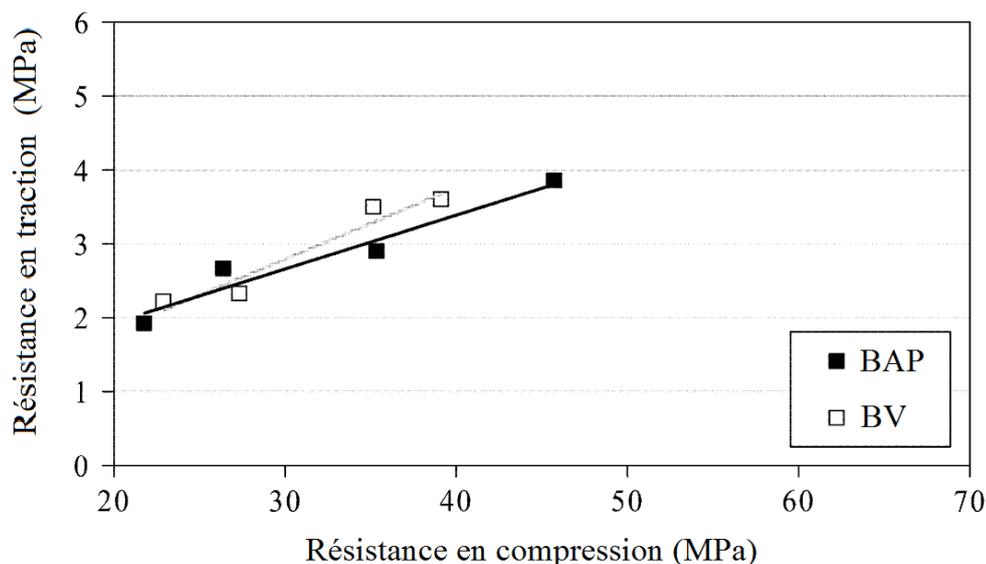


Figure 1.16: Résistance en traction à 7 jours [35].

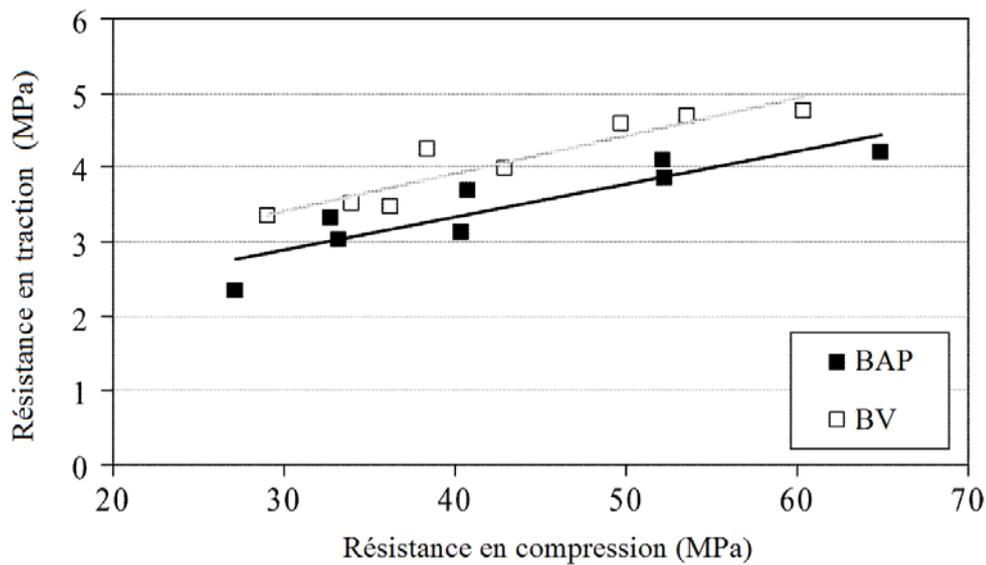


Figure 1.17: Résistance en traction à 28 et 90 jours [35].

Parra et al. [35] ont montré que la résistance à la traction est faible dans les BAP qu'en BV. En raison de la liaison granulats-pâte plus faible causée par l'emploi des différents types du superplastifiant ou un dosage élevé de fines dans les BAP. Selon le même auteur, il a été montré que l'utilisation d'un SP type polycarboxylate affaiblit la zone de transition granulats-pâte et résulte en une faible résistance en traction.

La présence d'une quantité élevée de fines favorise le phénomène de retrait donnant lieu à l'apparition d'un grand nombre de microfissuration au niveau de la zone de transition granulat-pâte, ce qui réduit également la résistance en traction. En outre, l'augmentation du volume des fines provoque une augmentation de la surface spécifique des granulats, avec une zone de transition granulat-pâte considérée comme la plus faible zone de béton.

Sahmaran et al. [31] ont trouvé que l'augmentation du dosage de la cendre volante fait diminuer la résistance des BAP en traction principalement à 28 jours.

1.7.4 Retrait

Le retrait correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par le ferrailage ou la présence de joint, ces variations dimensionnelles donnent lieu à l'apparition de fissurations précoces, d'ouverture consécutive.

Le retrait se présente comme la réduction de volume liée au départ ou à la consommation d'eau au sein du béton non contraint extérieurement (Figure 1.18 (b)). Par opposition, un gonflement s'observe par immersion de l'éprouvette (ou lors de conditions hygrométriques saturées) (Figure 1.18 (a)).

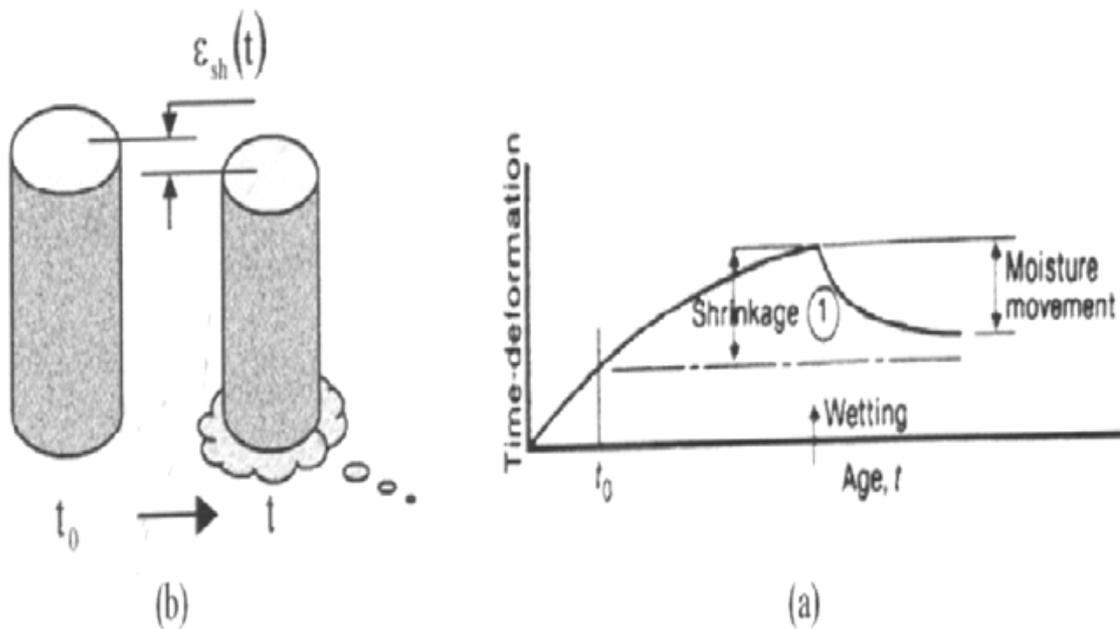


Figure 1.18 : (a) Déformation différée de retrait d'un spécimen non chargé

(b) Variation volumique d'une éprouvette de béton au retrait [37].

Plusieurs types de retrait se succèdent à partir de la fabrication du béton et jusqu'à maturité. Donc on peut noter :

i. Retrait de séchage (dessiccation)

Ce type de retrait est lié au séchage qui se manifeste avant, pendant et après la prise du béton. La fissuration qui en résulte est due à la dépression capillaire qui se produit lorsque des ménisques d'eau se forment dans les pores capillaires du béton frais. Ce retrait, qui est donc consécutif à l'évaporation de l'eau, peut se manifester quelques minutes après la mise en œuvre du béton, et se poursuivre quelques semaines après.

Le retrait de séchage est notamment diminué si la proportion « granulats/pâte de ciment » augmente [37]. Il se développe si l'humidité relative du béton est supérieure à l'humidité de l'air ambiant dans lequel se trouve le béton. Un gradient d'humidité se crée en fonction de la finesse de la porosité du béton et peut entraîner une fissuration de peau plus ou moins importante [38].

Le retrait de séchage, ou de dessiccation, est lié au séchage du matériau à partir de sa surface extérieure. L'eau contenue dans les pores de la pâte de ciment (et retenue par des forces capillaires d'autant plus grandes que la dimension de ceux-ci diminue) s'évapore vers le milieu ambiant, dont l'humidité relative est moindre, et crée une dépression qui contracte l'élément en béton [5].

Gesoğlu et al. [39] ont observé que les BAP confectionnés avec des liants binaires de cendre volante ou de laitier de haut fourneaux (ciment + cendre volante ou ciment + laitier) ont un faible retrait de séchage que celui observé pour le béton témoin (sans ajouts). Cet effet semble être plus prononcé avec l'augmentation du niveau de substitution des additions minérales. L'effet de la fumée de silice était d'accroître la déformation de retrait, en particulier lorsqu'elle est utilisée à des niveaux de substitutions de l'ordre de 10% à 15%.

Bouzoubaâ et Lachemi [40] n'ont trouvé aucune différence entre le retrait de séchage du béton témoin (sans cendre volante) et celui de BAP avec cendres volantes. Cependant, Sahmaran et al. [41] ont montré que les mélanges de BAP sans cendres volantes présentent

un retrait de séchage plus élevée à la fin de 365 jours. Ils ont conclu que l'incorporation de cendres volantes réduit le retrait de séchage en comparaison avec les mélanges BAP sans cendres volantes. Cette réduction est le résultat de densification de la matrice due à l'ajout des cendres volantes qui peut empêcher l'évaporation d'humidité interne (généralement attribuée à la forme, la propriété pouzzolanique, et l'effet micro-filler des cendres volantes) et/ou de l'effet des particules non hydratées des cendres volantes jouant le rôle des granulats fins empêchant la déformation dû au retrait.

Khatib [42] a rapporté que l'intégration des quantités croissantes des cendres volantes dans le BAP réduit le retrait de séchage, et que la substitution de 80% de ciment par cendres volantes réduit le retrait de un tiers à 56 jours (Figure 1.19). Une relation linéaire entre le retrait à 56 jours et l'augmentation du dosage en Cendres volantes a été observé (Figure 1.20).

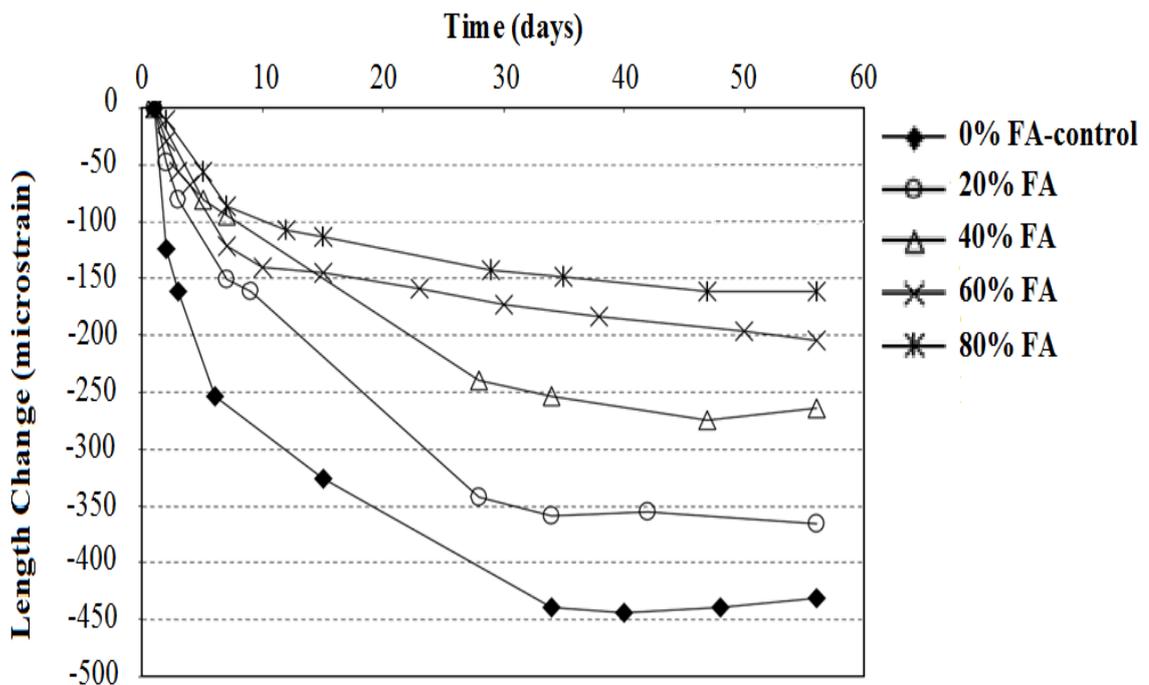


Figure 1.19: Influence de la cendre volante sur le retrait de séchage [42].

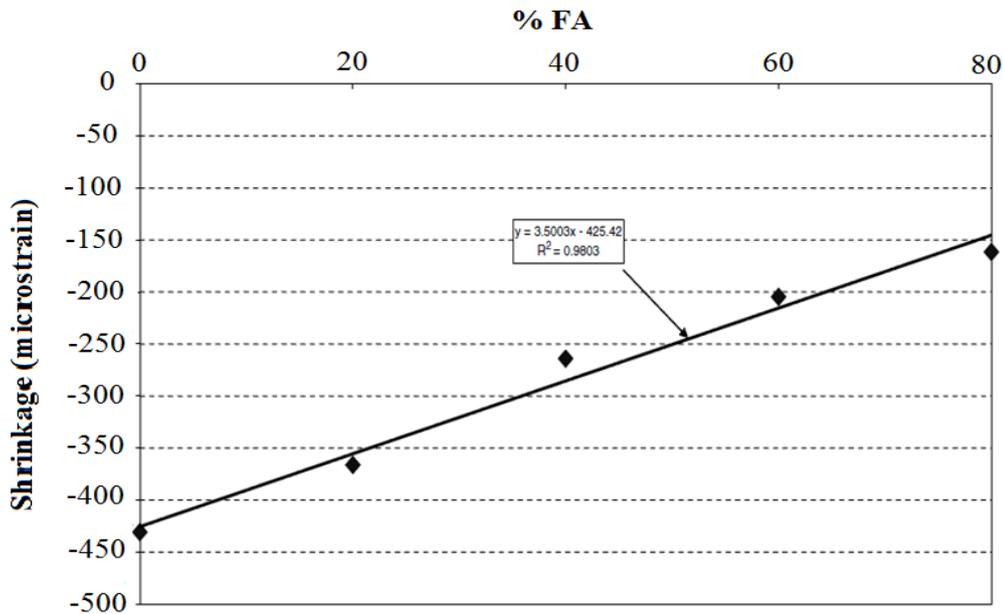


Figure 1.20: La variation retrait en fonction du dosage de CV à 56 jours de cure [42].

Güneyisi et al. [43] ont montré que la substitution du ciment par les cendres volantes, laitier et le métakaolin (MK) réduit le retrait de séchage des BAP alors que l'utilisation de la fumée de silice avec le ciment augmente graduellement le retrait. En outre, plus le niveau de substitution du ciment par la cendre volante, laitier et le MK est grand plus la valeur de retrait est faible. L'effet négatif de la fumée de silice sur le retrait de séchage des BAP a été éliminé dans le cas d'utilisation des liants tertiaires et quaternaires.

ii. Retrait endogène (d'auto-dessiccation)

Le retrait endogène est lié à la contraction du béton en cours d'hydratation et protégé de tout échange d'eau avec le milieu environnant. Il provient en fait d'un phénomène d'auto-dessiccation de la pâte de ciment consécutif à la contraction Le Chatelier (le volume des hydrates formés est plus petit que le volume de l'eau et du ciment anhydre initial) [44].

Après la phase d'hydratation, le mélange eau-ciment se raidit, c'est la prise. Les particules de ciment se soudent formant entre elles des ponts cristallins (Figure 1.21-a). Cette étape coïncide avec le début du retrait endogène, qualifié de retrait d'auto-dessiccation.

Le retrait endogène est également influencé par le nombre et le type de granulats car, à l'interface « pâte-granat », il est empêché par les granulats qui créent des zones de concentration de contraintes où vont se former les premières fissures (Figure 1.21-b).

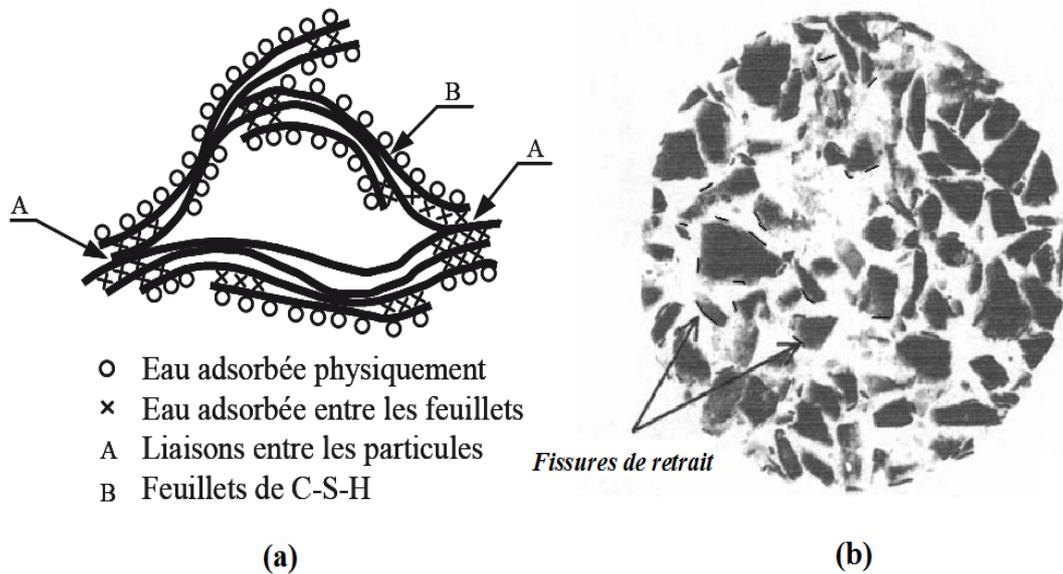


Figure 1.21 (a) Ponts cristallins lors de la prise

(b) Fissures de retrait sur la coupe d'une éprouvette [44].

L'auto-dessiccation peut être mise en évidence expérimentalement de façon directe et l'on constate (Figure 1.22) qu'elle augmente fortement lorsque le rapport E/C diminue. Une conséquence importante est que, si le retrait par auto-dessiccation est négligeable quand les rapports E/C sont de l'ordre de 0,6 (c'est le cas d'un béton courant dosé de ciment à 350 kg/m³ pour un affaissement de 8 cm mesuré au cône d'Abrams), ce phénomène prend de l'importance avec les bétons à hautes et à très hautes performances quand les rapports E/C sont de l'ordre de 0,3.

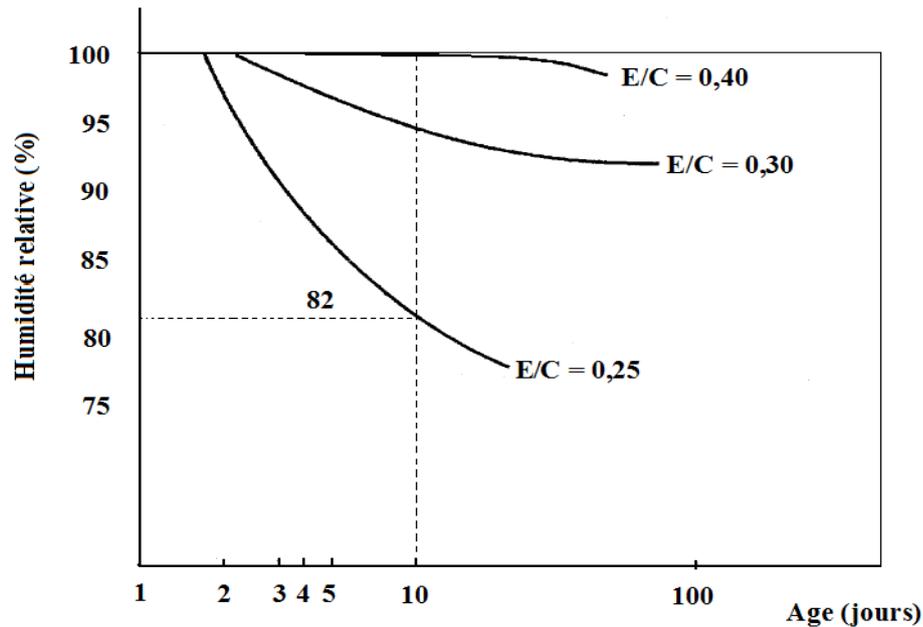


Figure 1.22 : Auto-dessiccation de la pâte de ciment en cours d'hydratation [45].

Rozière et al. [46] ont examiné l'influence de trois paramètres de composition des BAP, qui sont : le volume de pâte (série 1), dosage en eau (série 2), et le dosage du fillers calcaire (série 3). Ils ont constaté que :

- Le retrait libre est proportionnelle au volume de pâte, à condition que les proportions de pâte, en particulier rapport d'eau efficace sur ciment (W_{eff} / C) et rapport fine de calcaire sur ciment (LF / C), soient constantes (série 1) ;
- Si le volume de pâte est augmenté par la substitution des granulats par l'eau, l'augmentation de retrait observée dans la Série 2, est beaucoup plus grande que dans le cas de la série 1 (Fig. 1.23) ;
- L'augmentation du retrait total (du au séchage et à l'hydratation du ciment) avec l'augmentation de dosage en eau est une conséquence de l'augmentation de la porosité ouverte et donc de la cinétique de séchage (Fig. 1.24) ;
- Le retrait diminue lorsque le volume de pâte a été augmenté par la substitution des granulats par les filler calcaire (Fig. 1.25).

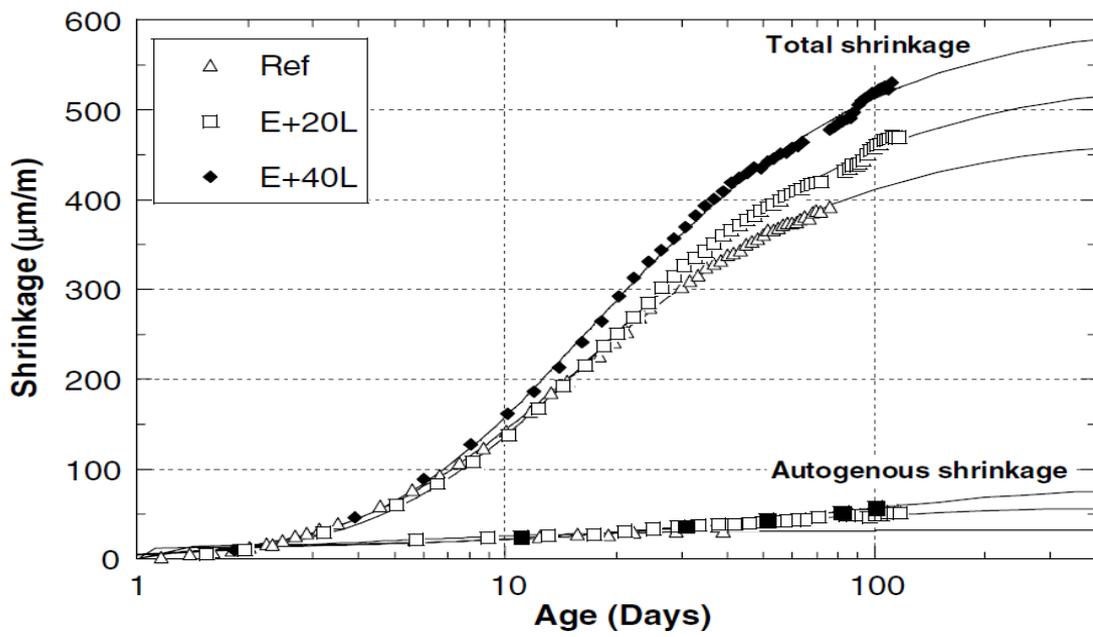


Figure 1.23 : Variation de retrait totale et retrait endogène des BAP de la série 1 [46].

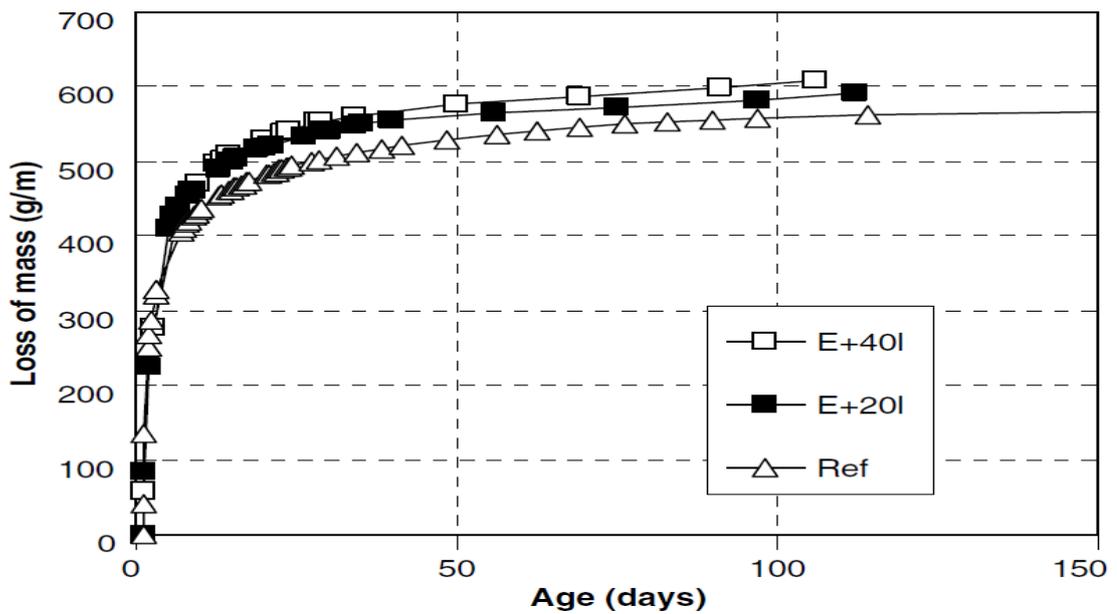


Figure 1.24 : Variation du perte de masse des BAP de la série 2 [46].

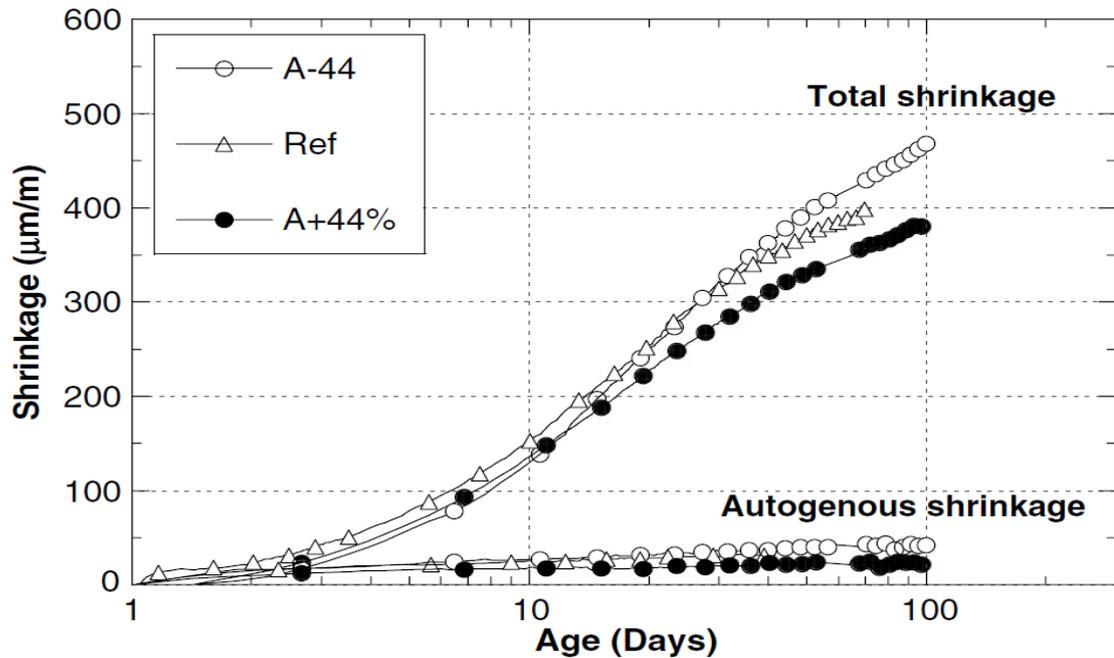


Figure 1.25 : Variation de retrait totale et retrait endogène des BAP de la série 3 [46].

iii. Retrait plastique

Ce retrait est en relation avec des déformations par tassement général du béton frais, déformations qui peuvent être gênées et créer une fissuration de surface au droit d'obstacles tels que des armatures par exemple. Ce retrait est limité à la période précédant la prise du béton, lorsque ce dernier reste suffisamment déformable pour subir des tassements.

Il est dû à l'évaporation de l'eau de la surface libre du béton frais après sa mise en place. Il risque de fissurer cette surface, ce qui est défavorable pour la durabilité. Pour remédier à ce problème, une cure humide est indispensable [47].

L'amplitude du retrait plastique est très importante comparée à celle du retrait hydraulique et dépend de la géométrie de l'ouvrage [44].

iv. Retrait thermique

Son mécanisme 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 chaleur à travers les coffrages qui n'offrent en général pas des conditions adiabatiques. 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 alors provoquer la mise en tension et la fissuration de celle-ci [47].

1.7.5 Fluage (Déformations sous charge)

Le fluage correspond à l'augmentation des déformations d'un élément de structure sous charge maintenue constante au cours du temps. Il est évalué par la différence des évolutions dans le temps des bétons chargés et non chargé [37].

La déformation de fluage est conventionnellement décomposée en une déformation de fluage propre (sans échange hydrique avec l'extérieur) et de fluage de dessiccation (avec échange). Chacune de ces composantes correspond à une configuration d'ambiance de conservation différente (en humidité relative).

Le fluage propre ou endogène est le fluage du béton chargé isolé de l'humidité du milieu extérieur en conditions isothermes à laquelle on a ôté la déformation de retrait endogène et la déformation élastique instantanée. Sous chargement, les feuillettes des hydrates (CSH) glissent progressivement les uns par rapport aux autres, ce qui peut expliquer le fluage à long terme. Concernant le court terme, le chargement provoque une migration progressive de l'eau adsorbée dans ou entre les hydrates vers les pores capillaires, ce qui diminue globalement le volume du béton [20].

Le fluage de dessiccation est le fluage qui vient s'ajouter au fluage propre lorsque le béton chargé est soumis à un séchage. Sous charge, la microfissuration créée par le gradient de retrait de séchage est faible, et donc le retrait est plus important [20].

Le fluage du béton dépend de nombreux facteurs. Les principaux paramètres ayant une influence sur le fluage sont [37] :

a. Rapport Eau / ciment (E/C)

Les bétons à fort ratio E/C contiennent un pourcentage élevé de pores et possèdent donc une capacité de rétention importante de l'eau. Or, plus la teneur en eau (évaporable) est importante, plus les déformations de fluage en compression comme en traction vont croître [37]. Cette amplitude dépend aussi de la qualité du ciment et de la quantité de pâte effective du béton. A ratio E/C constant, par exemple, on note une légère diminution des déformations avec un plus fort dosage en ciment. A l'inverse, à quantité d'eau équivalente mais pour des dosages en ciment plus faibles, les déformations de fluage augmentent (Figure 1.26).

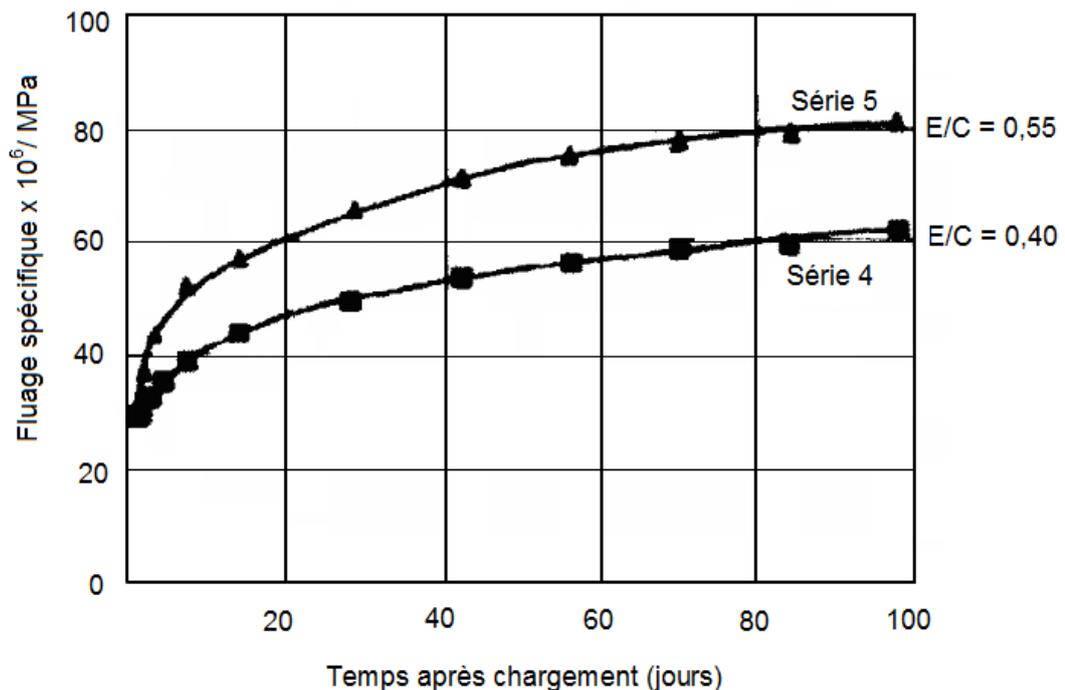


Figure 1.26 : Dépendance du fluage spécifique du rapport E/C [37].

b. Granulats

Les granulats influencent le fluage par la qualité (rigidité, forme, dimension, porosité et adhérence) et leur quantité modifie la part viscoélastique que constitue la pâte de ciment. L'augmentation de la taille des granulats améliore la raideur du matériau en réduisant la capacité de déformation [37].

c. Age du béton au moment du chargement

L'âge du béton lorsqu'on applique la charge est le paramètre le plus important qui influence le comportement visco-élastique du béton. La cinétique et l'amplitude du fluage diminuent si l'âge du chargement augmente [48].

d. Dimensions de la pièce du béton

Le fluage du béton est d'autant plus élevée que la dimension du spécimen est faible [37]. Le facteur déterminant est la surface du béton exposée à l'environnement à travers laquelle se produit l'échange d'eau. La différence de fluage entre éléments de dimensions différentes s'explique par un échange d'eau plus intense dans le cas d'une petite éprouvette.

Travaux concernant le BAP

Les comportements des bétons autoplaçants peuvent différer d'une formulation à l'autre. Mais globalement les BAP subissent des déformations sous charge équivalentes ou légèrement supérieures à celles des bétons vibrés correspondants (Figure 1.27 et 1.28). Les vitesses de développement des déformations diffèrent peu d'un type de béton à l'autre. L'augmentation des déformations différées est liée au volume de pâte plus important.

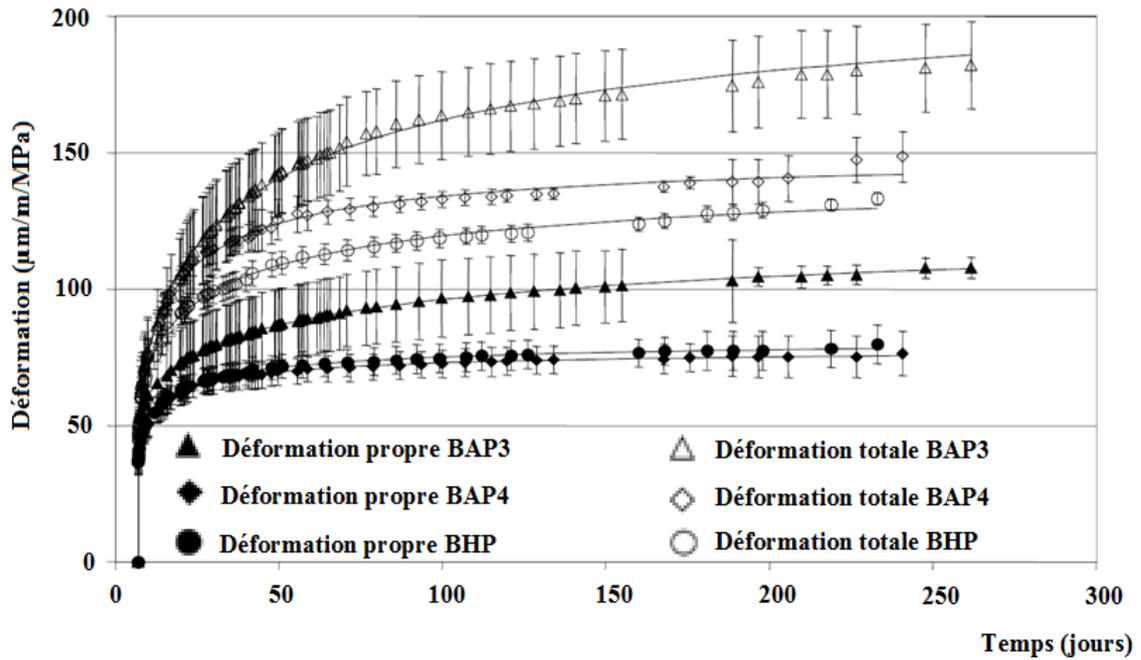


Figure 1.27 : Déformations sous charge unitaire pour des bétons de résistance supérieure à 40 MPa [49].

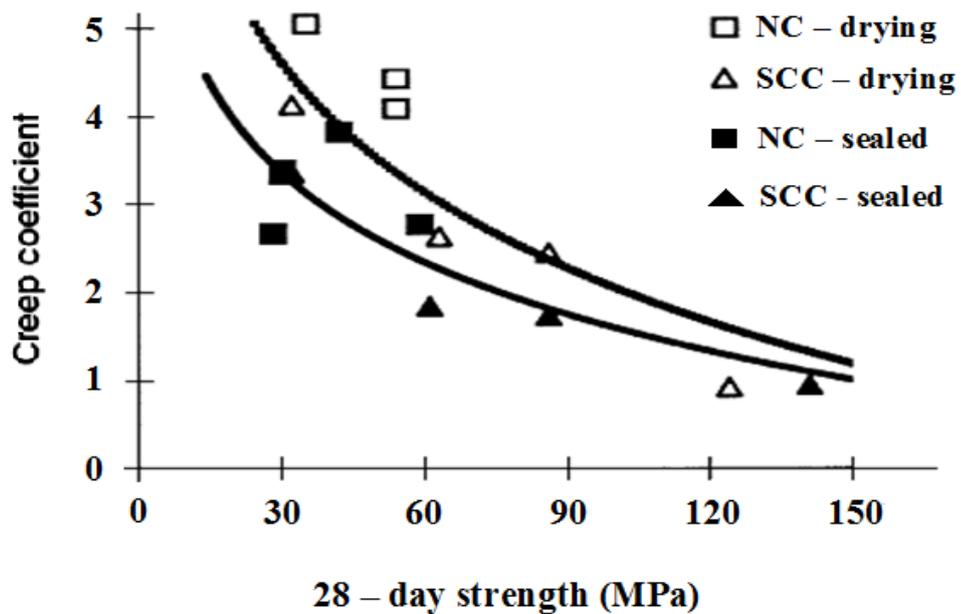


Figure 1.28 : Coefficients de fluage à 180 jours en fonction de la résistance mécanique [50].

Heirman et al. [3] ont trouvé que les BAP confectionnés avec le ciment CEM I montrent des déformations de fluage plus élevée que celle du BV confectionné avec le même ciment, en raison de leur volume élevé de pâte (Fig. 1.29). Cependant, les BAP fabriqués avec un ciment CEM III/A 42.5 N (SCC3) ont montré un faible fluage. Ce résultat est contradictoire avec d'autres travaux qui ont montré que la déformation de fluage est proportionnelle au dosage de laitier. Ceci est probablement dû à l'effet des ciments à durcissement rapide, qui fournissent une rigidité accrue à la matrice du béton, les rendent plus résistants au fluage.

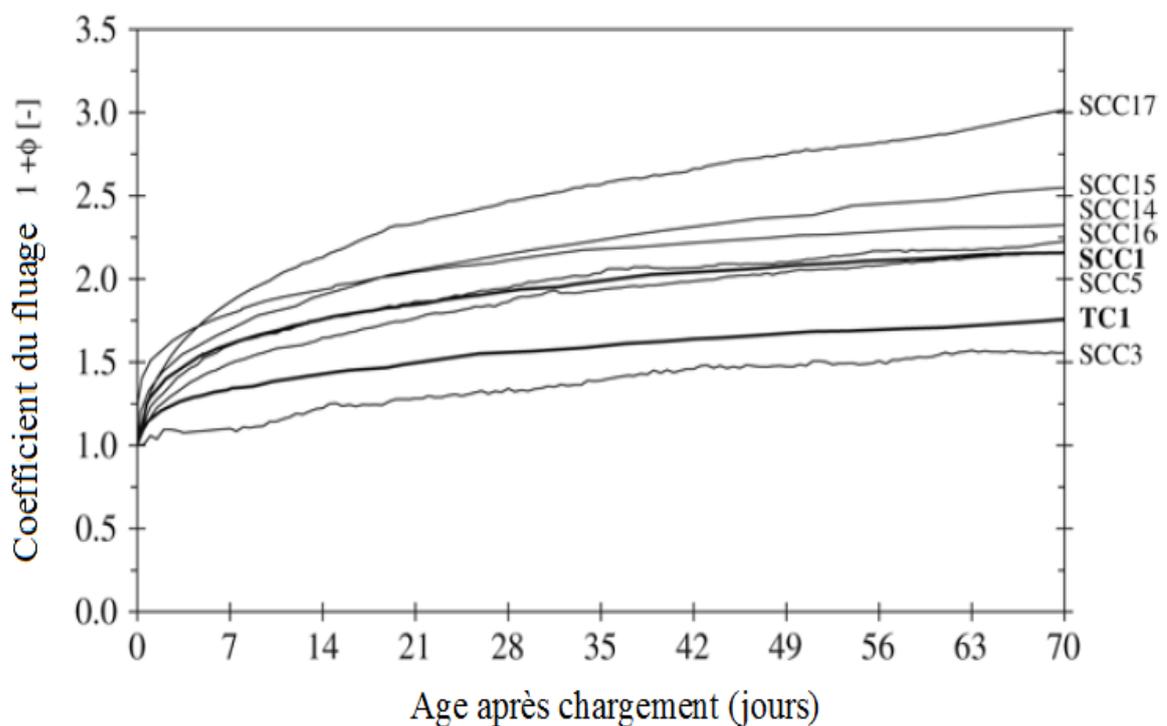


Figure 1.29 : Coefficients de fluage moyen en fonction de l'âge après chargement [3].

1.8 Propriétés physico-chimiques et durabilité

La durabilité du béton dépend largement de la facilité avec laquelle les fluides, à la fois liquides et gaz, peuvent pénétrer et se déplacer à l'intérieur du béton [4]. Les trois principaux mécanismes des transferts de fluides à l'intérieur du béton sont la perméation, la diffusion et l'absorption [5]. La première décrit un écoulement qui se produit sous gradient de pression [45]. La diffusion est un transport à l'échelle moléculaire sous gradient de concentration [45] et l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires [5].

1.8.1 Perméabilité aux gaz

La perméabilité est une propriété de transfert qui caractérise la durabilité du béton. La perméabilité de la pâte de ciment hydraté durci est liée à la nature du réseau poreux à l'intérieur même de la pâte de ciment, mais aussi de la zone voisine de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats. Le réseau poreux est constitué de pores communicants (porosité ouvert), de pores isolés (porosité fermée) et de pores aveugles accessibles par une extrémité uniquement.

Les pores correspondant à la perméabilité sont ceux dont le diamètre est d'au moins 120 ou 160 nm, ces pores doivent être continus. Les pores qui ne sont pas importants en ce qui concerne l'écoulement, c'est-à-dire la perméabilité, comprennent, en plus des pores discontinus, ceux qui contiennent de l'eau adsorbé et ceux l'ouverture est étroite, même s'ils ont eux même de gros diamètres (Figure 1.30).

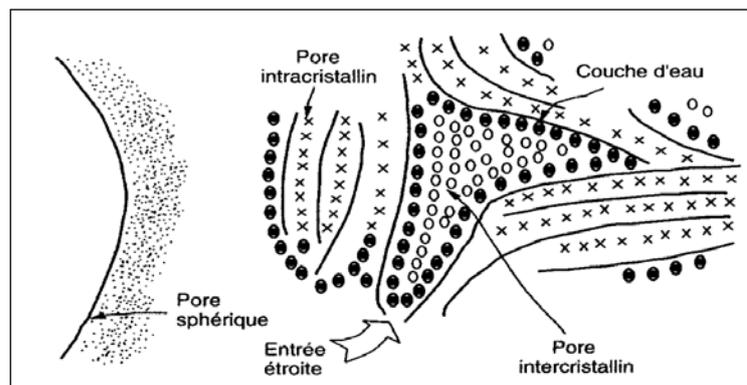


Figure 1.30 : Représentation schématique du système poreux d'une pâte de ciment hydraté [4].

L'utilisation des additions minérales dans les BAP réduit la perméabilité du béton. Trägårdh [51] a montré que les fillers calcaire, donnent aux BAP une microstructure plus dense que les bétons vibrés de même rapport E/C.

Zhu et Bartos [52] ont trouvé que la perméabilité à l'oxygène des BAP est plus faible que celle des bétons vibrés BV (Tableau 1.1). Le BAP qui ne contient pas d'ajout minéral mais plutôt un agent viscosant (SCC3) a montré une perméabilité plus élevée que celle observée pour d'autres BAP qui incluent soit le calcaire (SCC1) soit les cendres volantes (SCC2).

Tableau 1.1 : Résultats du coefficient de perméabilité à l'oxygène [52]

Echantillon du béton	Type d'ajout	Agent viscosant	Classe de résistance	
			C40	C60
			Coefficient de perméabilité (10^{-17} m^2)	
BV 1	Sans ajout	Sans	$12,8 \pm 0,5$	$10,4 \pm 0,3$
BV 2	Cendres volantes	Sans	$13,9 \pm 1,1$	$5,0 \pm 0,4$
BAP 1	Fillers calcaires	Sans	$5,5 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,6$
BAP 2	Cendres volantes	Sans	$4,1 \pm 0,2$	$2,9 \pm 0,1$
BAP 3	Sans ajout	Avec	$8,2 \pm 1,5$	$7,3 \pm 0,7$

Assié et al. [53] ont trouvé des résultats similaires pour les BAP à base de fillers calcaire sur trois classes de résistance C20, C40 et C60 (Fig. 1.31).

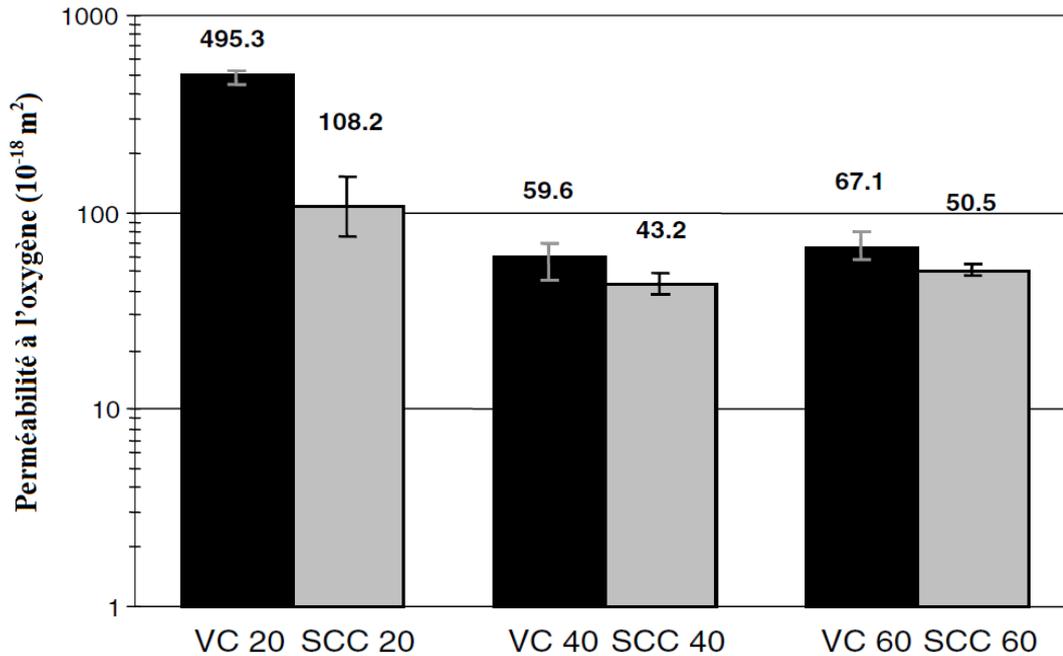


Figure 1.31 : Perméabilité apparent des bétons étudiés à l'oxygène
($P_{\text{appliquée}}=0,2 \text{ MPa}$, matériau sec) [53].

1.8.2 Diffusion des ions chlore

La pénétration des chlorures nécessite la présence d'une phase liquide. En milieu saturé (cas des ouvrages immergés dans l'eau de mer), ou partiellement saturé (zone de marnage) mais avec interconnection de la phase liquide du béton poreux, les ions chlorures pénètrent dans le béton par diffusion [54]. Cette dernière est le résultat d'un transfert de matière, à travers le béton, dû à un gradient de concentration (diffusion moléculaire) [5].

Lorsque les ions chlorures se retrouvent en quantité suffisante (concentration minimale) dans l'eau interstitielle du béton, ils engendrent une diminution du pH. Au voisinage des armatures en acier, cette diminution de pH détruit progressivement la couche protectrice (couche passive à la surface de l'acier noyé dans le béton) des armatures.

D'après Zhu et Bartos [52], la résistance à la pénétration des ions chlorure est très influencée par le type d'addition minérale employé dans le béton. Particulièrement, les bétons formulés avec la cendre volante (REF2 et BAP2) ont montré de très faibles coefficients de

migration des ions chlore par rapport aux autres mélanges, principalement pour de faible classe de résistance. Par contre le BAP confectionné sans ajout minéral (BAP3) avec l'emploi d'un agent viscosant, a montré une très grande valeur de pénétration des ions de chlorures. Le béton formulé avec (BAP1) ou sans filler calcaire (béton vibré REF1) présente des coefficients de migration similaires, pour une classe de résistance C40 (Tableau 1.2). Par contre, les valeurs de coefficient de migration du BAP1 ont été plus élevé que celle observé pour le béton vibré REF1 à une classe de résistance C60.

Tableau 1.2 : Résultats du coefficient de migration des ions chlore [52]

Echantillon du béton	Type d'ajout	Agent viscosant	Classe de résistance	
			C40	C60
			Coefficients de migration des ions chlore ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	
BV 1	Sans ajout	Sans	43,6	9,4
BV 2	Cendres volantes	Sans	12,9	6,6
BAP 1	Fillers calcaires	Sans	41,9	12,7
BAP 2	Cendres volantes	Sans	8,4	6,3
BAP 3	Sans ajout	Avec	54,6	16,2

Les résultats des essais de diffusion des ions de chlore mené par Assié et al. [53] ont montré que le comportement des BAP (formulés avec les fillers calcaires) est équivalent à celui des bétons vibrés pour différentes classes de résistances (Fig. 1.32).

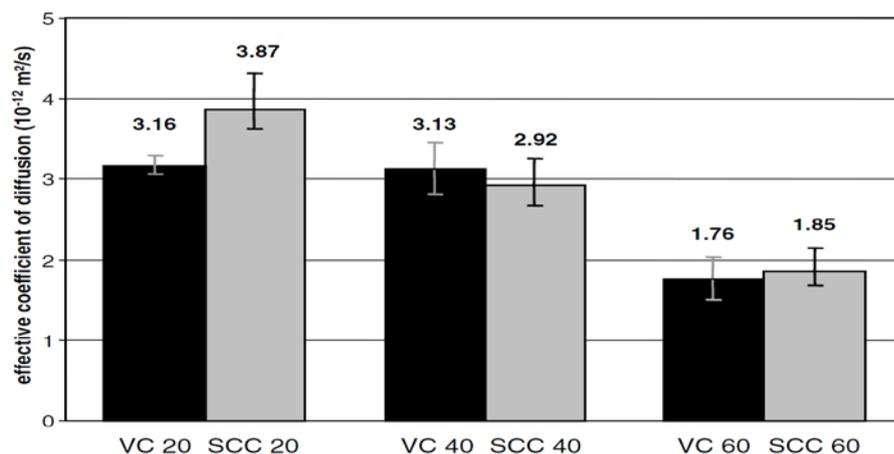


Figure 1.32 : Valeurs du coefficient effective de diffusion des ions chlore des bétons étudiés [53].

Nehdi et al. [55] ont montré que les BAP avec ciment ternaire (ciment portland ordinaire + deux ajouts) et quaternaire (ciment portland ordinaire + trois ajouts) ont de très faibles valeurs de pénétration des ions de chlore par rapport au BAP de référence formulé avec un ciment portland sans ajouts (Fig. 1.33). Les ajouts utilisés sont le laitier de hauts fourneau, cendres volantes de classe F, fumé de silice et enfin les cendres de riz (noté par RHZ).

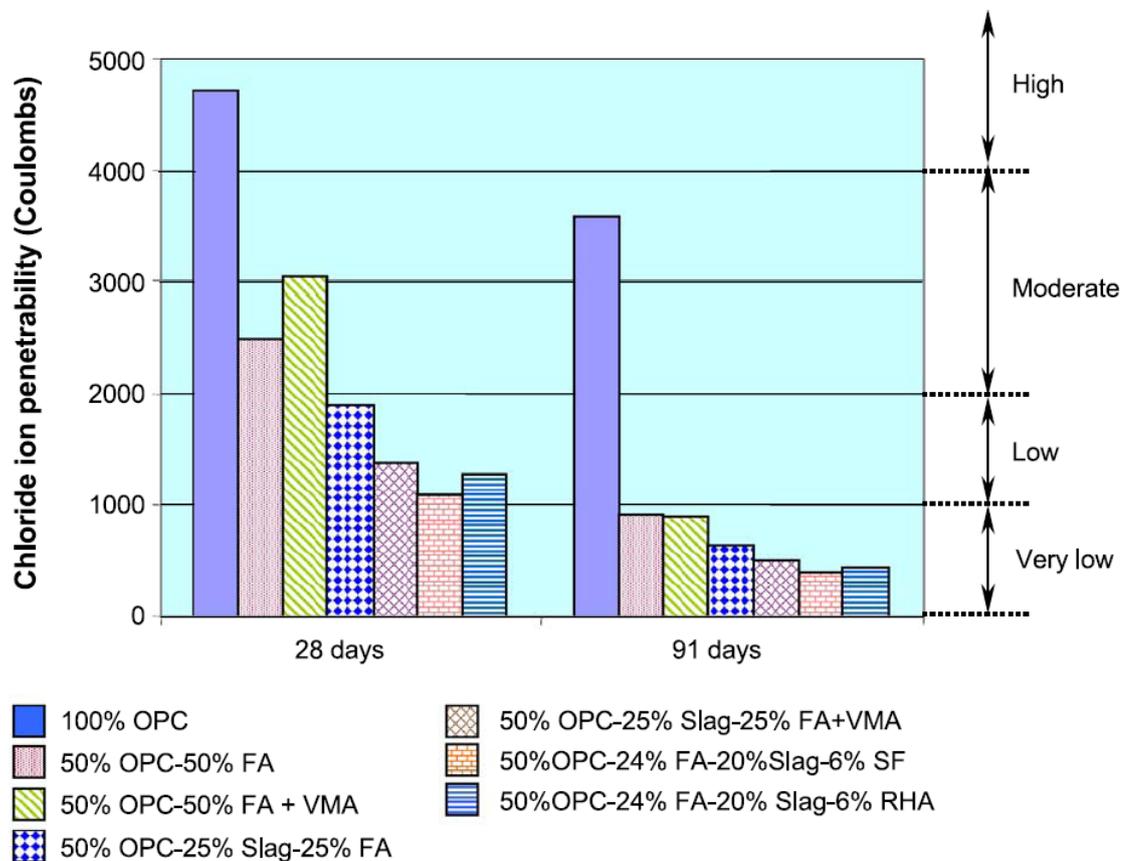


Figure 1.33 : Pénétration d'ions chlorure à 28 et 91 jours pour les différents mélanges des BAP [55].

D'après Halit Yazici [30], la substitution du ciment par les cendres volantes et/ou la fumée de silice augmente la résistance des BAP à la pénétration des ions de chlore après 90 cycles de gel- dégel (Fig. 1.34).

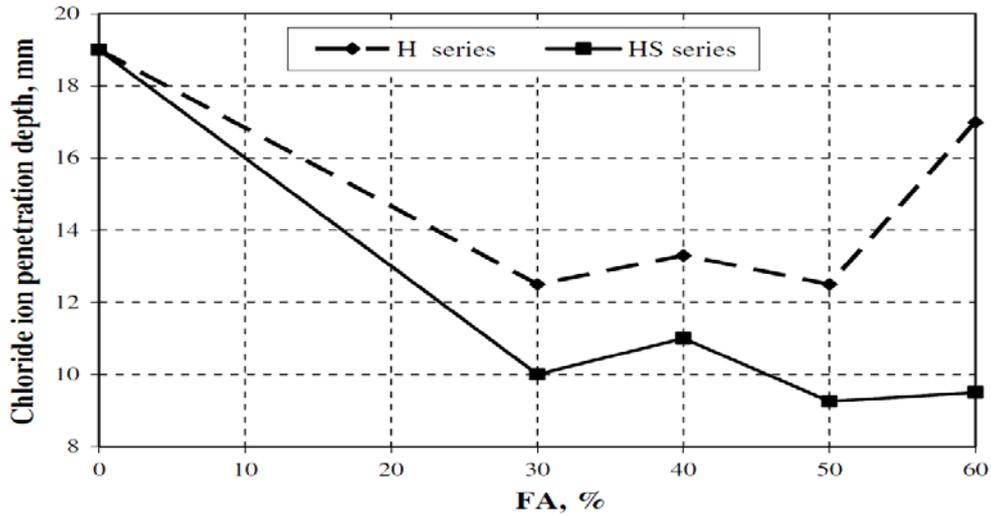


Figure 1.34 : L'effet du dosage de la cendre volante sur la profondeur de pénétration des ions chlore après 90 cycles de gel-dégel [30].

D'après la comparaison des résultats d'essai de pénétration des ions de chlore avec les limites imposés par la norme ASTM C 1202 (Fig. 1.35), il a été observé que les BAP avec les cendres volantes présentent une plus grande résistance à la pénétration des ions de chlore par rapport aux BV, et cette résistance augmente avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par les cendres volantes. Huit mélanges de BAP de classes de résistance à la compression allant de 20 à 100 MPa et à des taux de substitution de 0, 10, 30, 50 et 85% ont été analysés.

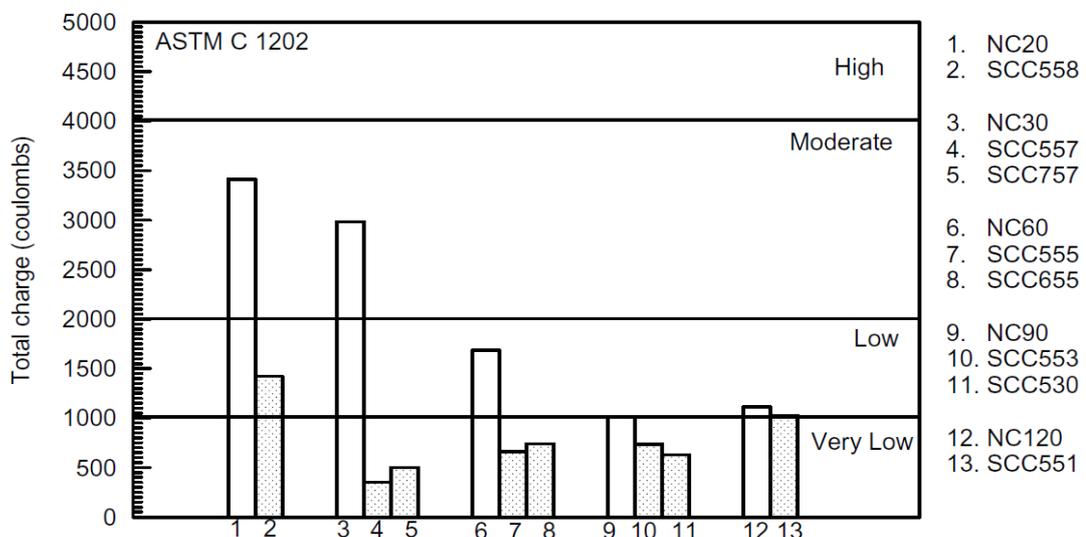


Figure 1.35 : les valeurs de la perméabilité des bétons étudiés aux ions de chlore [56].

1.8.3 Absorption capillaire

L'absorption est le résultat des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant [4]. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec dépend de la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité) [5].

Les travaux de Zhu et Bartos [52] ont démontré que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés (Fig. 1.36) de classe de résistance équivalente. L'absorption est d'autant plus faible avec le dosage élevé en cendres volantes. Par contre, il a été observé que le BAP contenant un agent de viscosité et aucune addition minérale présente une absorptivité élevée.

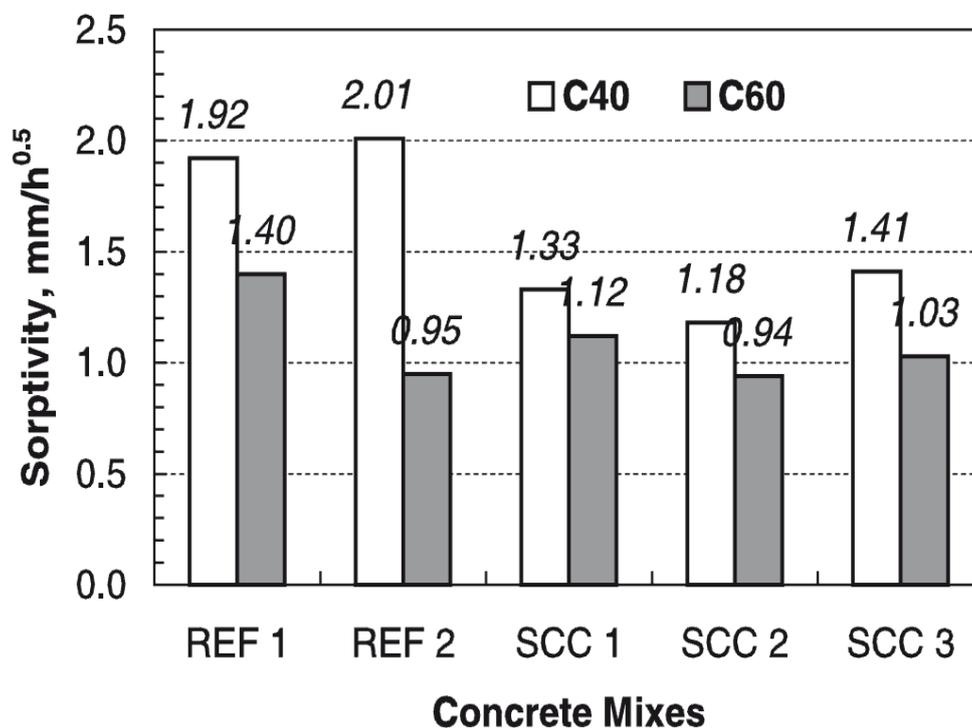


Figure 1.36 : Résultats d'absorption d'eau par capillarité des bétons étudiés [52].

Par contre, Assié et al. [53] ont observé que l'absorption d'eau des BAP par capillarité est sensiblement plus élevée que celle des BV à des classes de résistance semblables (Fig. 1.37).

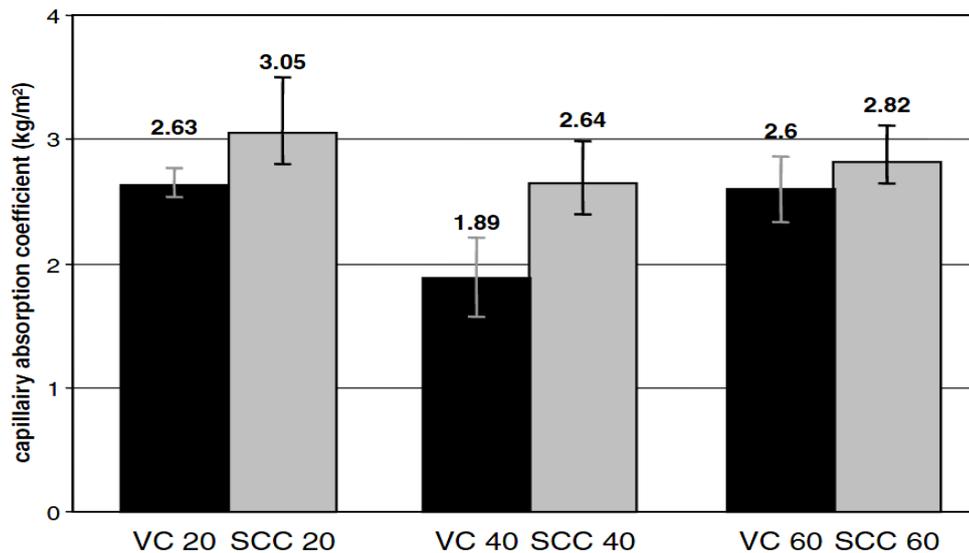


Figure 1.37 : Coefficient d'absorption capillaire (à 24h) des bétons étudiés [53].

Liu [57] a observé une diminution de la sorptivité des BAP incorporant jusqu'à 40% de cendres volantes (Fig. 1.38). Cette diminution est due au remplissage efficace des vides par la cendre conduisant à une faible porosité. Mais, à partir d'un dosage en cendres de 40%, la sorptivité des mélanges du BAP augmente de manière significative.

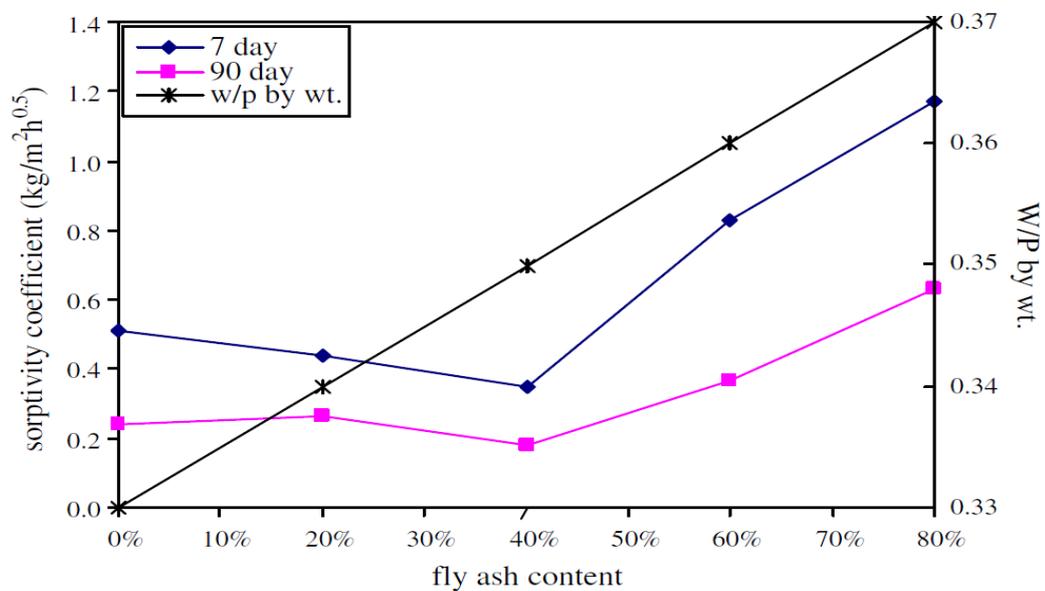


Figure 1.38 : Influence des cendres volantes sur la sorptivité [57].

1.8.4 Carbonatation

Le dioxyde de carbone CO_2 réagit avec les hydroxydes de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ présent dans le béton en présence d'eau pour former des carbonates de calcium CaCO_3 et provoque ainsi une diminution importante de la valeur du PH de la solution des pores (d'environ 13 à 9). Lorsqu'un front de PH plus faible atteint les alentours de la surface des armatures, la couche protectrice (couche mince d'oxyde passif) disparaît et la corrosion peut se produire [4].

Assié et al. [53] ont montré que la dégradation des BAP par carbonatation est plus rapide que celle observée dans les BV (Fig. 1.39). En outre, dans les conditions d'essai imposé dans l'étude, c.à.d, taux de dioxyde de carbone de $50 \pm 1\%$ et humidité relative de $65 \pm 5\%$, ces profondeurs de carbonatation restent faibles, soit moins de 25 mm à 28 jours d'essai (correspondant à la valeur atteint après 40 ans dans des conditions naturelles) pour les BV, et moins de 10 mm à 56 jours pour le béton de structure (correspondant à la valeur atteint après 200 ans dans des conditions naturelles).

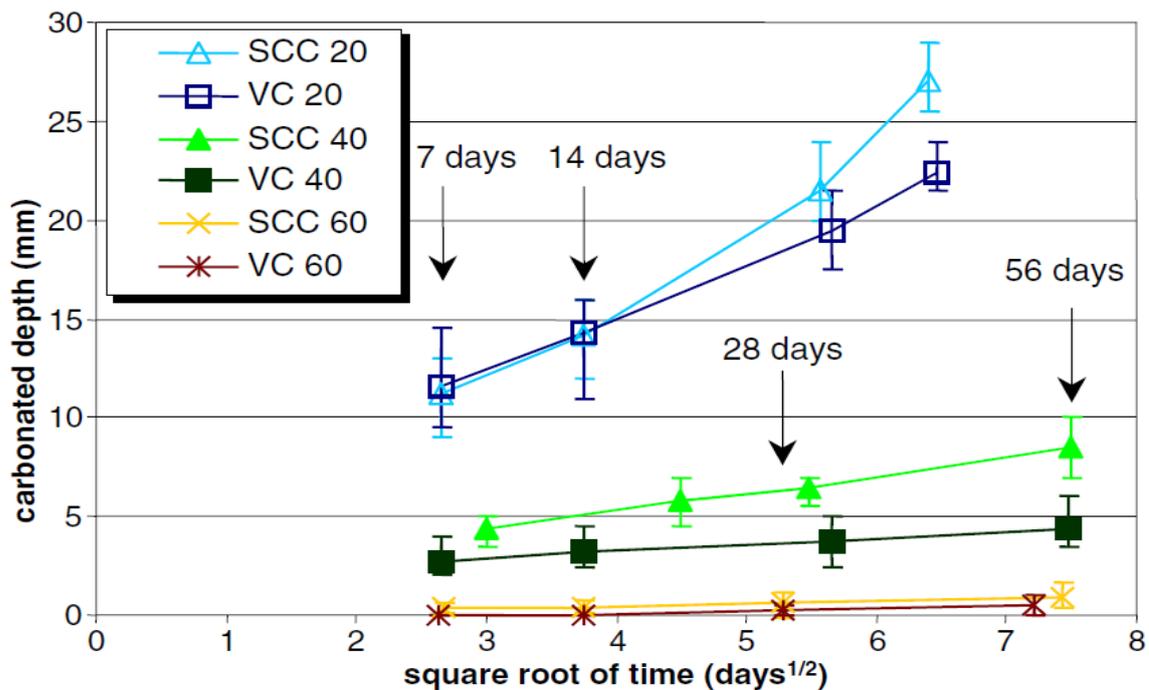


Figure 1.39 : Profondeur de carbonatation des bétons étudiés ($t_0=28$ jours) [53].

Des résultats similaires ont aussi été rapporté (Fig. 1.40). L'ajout calcaire conduit à une faible porosité et une structure poreuse plus fine. Cependant, à un rapport E/C constant, l'utilisation des ciments de classe de résistance plus élevée réduit le coefficient de carbonatation d'environ 33% dans les BAP et 27% dans les BV.

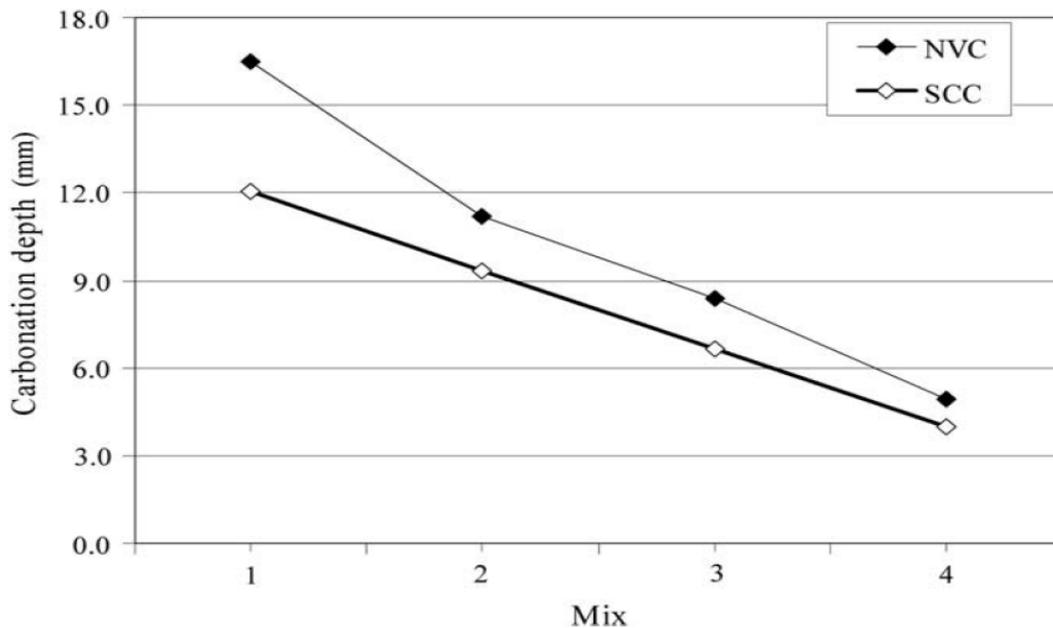


Figure 1.40 : Profondeur de carbonatation des bétons étudiés à l'âge de 42,5 mois [58].

1.8.5 Cycles de gel-dégel

Les cycles de gel-dégel engendrent des dégradations progressives dans le béton. Le gel provoque la migration d'eau contenue dans les pores vers des zones où elle peut geler et créer des fissures sous l'effet de la formation de glace. Lors du dégel, ces fissures ne se referment pas et se remplissent d'eau qui est disponible pour un nouveau cycle de gel [5].

Yazici [30] a étudié l'influence de la substitution du ciment par les cendres volantes (de 30 à 60%) et/ou la fumée de silice (10%) sur la résistance résiduelle en compression et en traction des BAP, après 90 cycles de gel-dégel. Les résultats ont montré que la résistance résiduelle en compression des BAP contenant les cendres volantes et/ou la fumée de silice (HS) a dépassée celle du BAP témoin (H) (Fig. 1.41). Cependant, l'augmentation du dosage des cendres volantes à plus de 30% diminue la résistance résiduelle en traction des BAP avec cendre volante seule (Fig. 1.42).

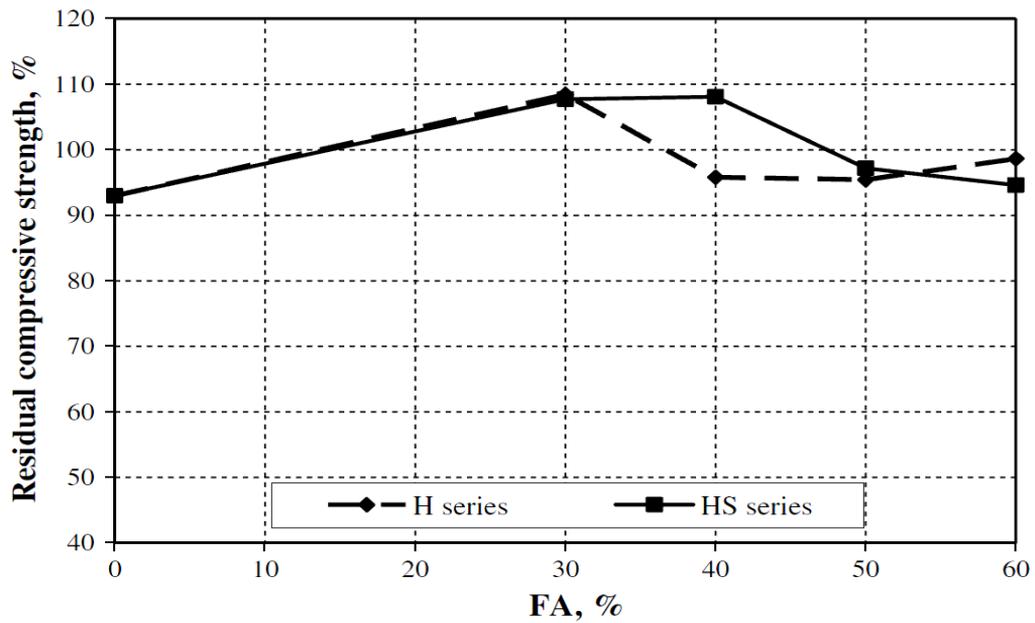


Figure 1.41 : Résistance résiduelle en compression après 90 cycles de gel-dégel [30].

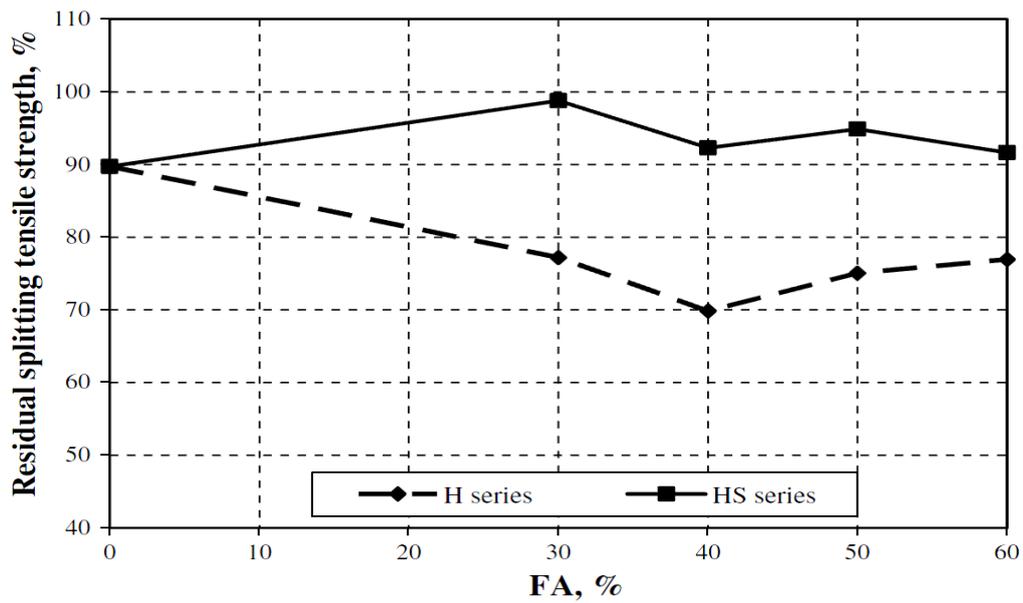


Figure 1.42 : Résistance résiduelle en traction après 90 cycles de gel-dégel [30].

Vejmelková et al. [59] ont étudié l'influence du laitier de haut fourneau et le métakaolin sur la résistance des BAP au gel par l'évaluation de la perte de masse. Les résultats (Tableau 1.3) ont montré que le BAP-M (à base de métakaolin) ne présente pas de perte de masse jusqu'à 56 cycles de gel-dégel. Pour le BAP-S (à base de laitier), la perte de masse était de 0,396 kg/m² après 56 cycles montrant ainsi une bonne résistance au gel-dégel.

Tableau 1.3 : Résistance au gel en terme de perte de masse (kg/m²) [59].

Material	Number of cycles			
	14	28	42	56
SCC-S	0.205	0.323	0.356	0.396
SCC-M	0	0	0	0

1.8.6 Résistance aux sulfates

L'attaque sulfatique est associée à la précipitation de produits sulfatés secondaires, d'une expansion importante et de la détérioration chimio-mécanique (modifications des propriétés de transport de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion,...). Ceci peut conduire à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé (type et rapport Eau/Ciment) [12].

Bertil Persson [50] a étudié la résistance des BAP et BV conservé dans une solution de sulfate de sodium, l'eau de mer ou l'eau distillé par l'évaluation de la perte de masse. Une grande perte de masse a été observée dans les BAP en comparaison aux bétons de référence (BV). Ceci est probablement dû à la présence des fillers calcaire dans le BAP. Par contre, les bétons (BAP et BV) qui ont été conservés dans l'eau de mer ou l'eau distillé n'ont pas présenté une perte de masse.

1.9 Conclusion

L'étude bibliographique a mis en évidence que les BAP constituent une véritable alternative aux bétons traditionnels, comme le montre certains exemples. Les BAP sont des bétons très fluides, se mettant en place sans vibration, présentent de nombreux intérêt, mais la fluidité et la stabilité sont des propriétés apparemment contradictoire. Leurs formulations est donc relativement complexe et nécessite de trouver un bon compromis. Cependant, une fluidité élevée de ce béton est obtenu par l'adjonction d'un superplastifiant, et qui peut provoquer la ségrégation. Ce phénomène peut être contrarié par l'emploi des agents viscosant ou une grande quantité des ajouts minéraux. Les méthodes de formulation des BAP dans cette synthèse sont multiples et sont tous des méthodes empiriques, elle nécessite un certain nombre d'essais pour caractériser les constituant ou leurs interactions. Les essais en laboratoire qui seront présentés dans le chapitre 2 sont pratiquement indispensables à une formulation scientifique des BAP.

D'après les travaux de recherche appliqués sur les BAP on peut conclure que l'utilisation des ajouts sous forme d'un liant binaire, tertiaire ou même quaternaire améliore la performance du BAP à l'état frais et durci (propriétés mécanique et durable). Il est clair que la performance des BAP contenant la pouzzolane naturelle a été peu étudiée. Par conséquent, nous nous sommes intéressés à étudier l'effet de la pouzzolane naturelle ainsi que sa finesse sur le comportement rhéologique des BAP, dans le but de valoriser l'utilisation de la pouzzolane naturelle comme substituant au ciment dans la formulation des BAP en appliquant l'approche japonaise amélioré par Domone, en raison de la simplicité de sa procédure de sa réalisation, ainsi que pour la disponibilité des dispositifs d'essai nécessaires.

CHAPITRE 2

MATERIAUX ET ESSAIS

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons le programme expérimental. On décrit les matériaux utilisés ainsi que les méthodes d'essais réalisés.

2.2 Caractérisation des matériaux

2.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est du type CEM I 42,5. Le choix de ce ciment sans ajout est justifié par l'étude de l'effet de l'addition sur le comportement rhéologique des bétons autoplaçants. Ce ciment présente une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa.

Les caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment utilisé sont données par le Tableau 2.1. En plus, les caractéristiques physiques et mécaniques ont été réalisés au laboratoire Géomatériaux et Génie Civil de l'Université de Blida et sont données par le tableau 2.2.

Tableau 2.1 : Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment CEM I 42,5

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

Tableau 2.2 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment CEM I 42,5

Masse volumique apparente (ρ_{app}) (kg/m ³)	1200	
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (kg/m ³)	3050	
Finesse SSB (cm ² /g)	2900	
Temps de début de prise (heure, minute)	2h15	
Temps de fin de prise (heure, minute)	5h25	
Résistance à la compression (MPa)	2 jours	14,53
	7 jours	31,10
	28 jours	44.06

2.2.2 La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle est d'origine volcanique extraite du gisement volcanique dans la région de Beni-Saf. Cette pouzzolane est fournie sous forme de roches concassées de type pierre ponce et scorie (Figure 2.1). Pour pouvoir l'utiliser comme addition dans les différentes compositions de BAP, nous avons d'abord procédé à son étuvage à 50°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage. Dans le contexte de notre thèse trois différentes finesses ont été visées, 3500, 4200 et 5000 cm²/g.

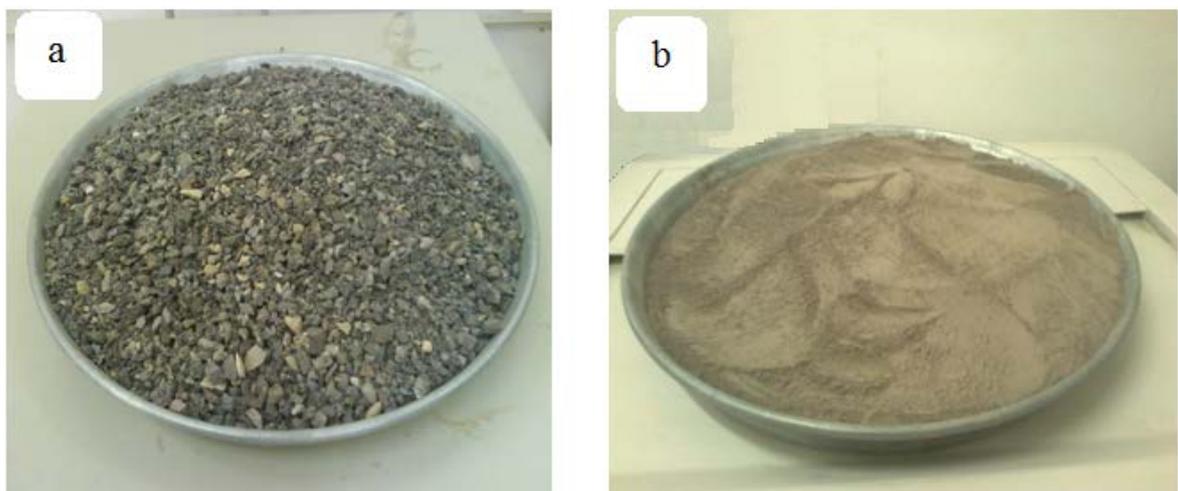


Figure 2.1 : Scories de la pouzzolane naturelle utilisée

(a) avant broyage, (b) après broyage.

Le broyage consiste donc à fragmenter la matière jusqu'à l'obtention d'une poudre, pour favoriser les réactions des éléments chimiques (généralités sur le broyage en Annexe A). Dans notre cas on a utilisé un broyeur à boulets de vitesse de 56 tr/min (laboratoire de chimie, Université de BLIDA) (figure 2.2). Pour fixer le temps nécessaire pour avoir la finesse voulue nous avons pris des échantillons avec plusieurs intervalles de temps (15min, 30min, 45min, 60min, 75min) et on calcule le temps (t : Temps de passage de l'air à travers un lit de poudre) qui nous sert à calculer la surface spécifique Blaine. Cela nous permet donc d'établir un graphe donnant la variation de la finesse de la PZN en fonction du temps de broyage (figure 2.3).



Figure 2.2 : Broyeur à boulets.

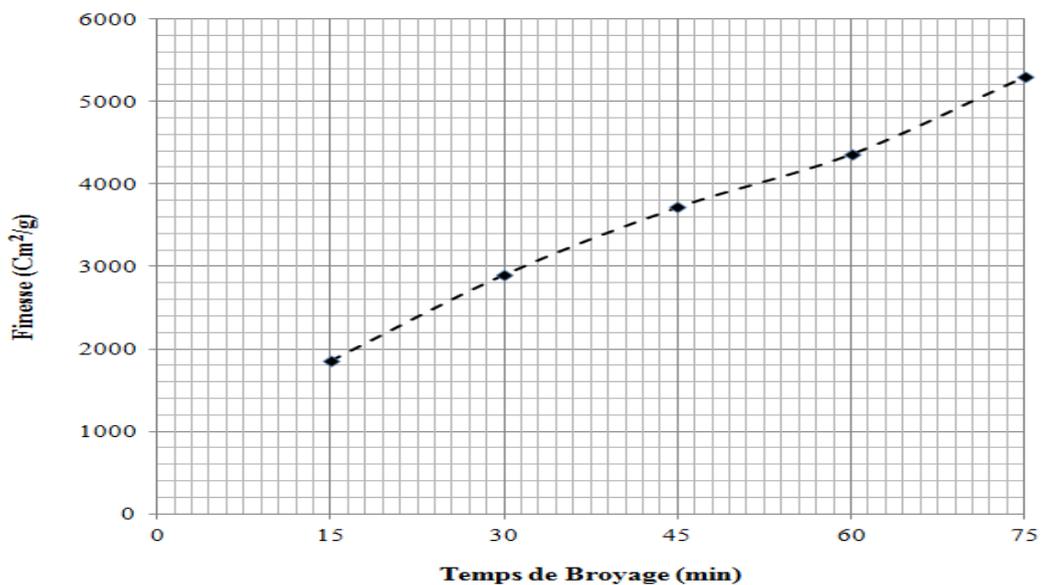


Figure 2.3 : Variation de la finesse de la PZN en fonction du temps de broyage.

La poudre résultante a été l'objet d'une analyse physico-chimique, dont les résultats sont fournis dans le tableau 2.3. et le tableau 2.4 donne la composition minéralogiques de la pouzzolane naturelle.

Tableau 2.3 : Analyse chimique et caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle [60]

Caractéristiques	Teneur (%)
SiO ₂	45,67
CaCO ₃	-
CaO	8,98
AL ₂ O ₃	15,10
Fe ₂ O ₃	10,14
MgO	3,45
Na ₂ O	3,00
SO ₃	0,19
HCl	nul
Densité spécifique	2,81

Tableau 2.4 : Composition minéralogique de la pouzzolane naturelle [60]

Minéraux	%
Feldspath plagioclase (Anorthite : CaO.AL ₂ O ₃ .2SiO ₂)	40
Pyroxène (Augite (Mg, Fe) ₂ .2SiO ₆)	15
Verre volcanique	14
Analcime (zéolithe)	12
Chlorite (6Mg ₅ AlSi ₃ O ₁₀)(OH)	6
Hématite :Fe ₂ O ₃ Magnétite :Fe ₂ O ₃ FeO Biotite : 2K(Fe,Mg) ₃ AlSiO ₁₀ (OH)	8
<i>Autres minéraux</i> : basaltes, calcites, Dolomites, argiles, etc...	5

Les caractéristiques physiques de la pouzzolane de Beni-Saf (Algérie) sont données dans le tableau 2.5 :

Tableau 2.5 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle

Finesse SSB (cm ² /g)	Densité apparente	Densité absolue
3500	1,05	2,81
4200	1,01	
5000	0,98	

2.2.3 Les granulats

2.2.3.1 Le sable

Le sable utilisé est un sable roulé provenant de la région de Baghlia (wilaya de Boumersdes) de classe granulaire 0/5, ayant un module de finesse de 3.32 et un équivalent de sable de 78,3% au piston et de 82,3% visuelle, de densité absolue de 2,56, de densité apparente de 1,6 et d'un coefficient d'absorption (A_b) de 1,1% ainsi qu'une humidité (μ_s) de 1,67%. Sa courbe granulométrique est donnée par la figure 2.6.

2.2.3.2 Le gravier

Le gravier utilisé est un gravier provenant de la région de Setif composé de deux classes granulaires (3/8 et 8/15) dont les principales caractéristiques sont illustrées dans le tableau 2.6. Les courbes granulométrique du sable et gravier utilisés sont données par la figure 2.4.

Tableau 2.6 : caractéristiques des granulats

Granulats	Classe granulaire (mm)	Densité absolue	Densité apparente	Coefficient d'absorption	Humidité (%)
Gravier	3/8	2,715	1,465	0,500	0,130
	8/15	2,715	1,475	0,500	0,300

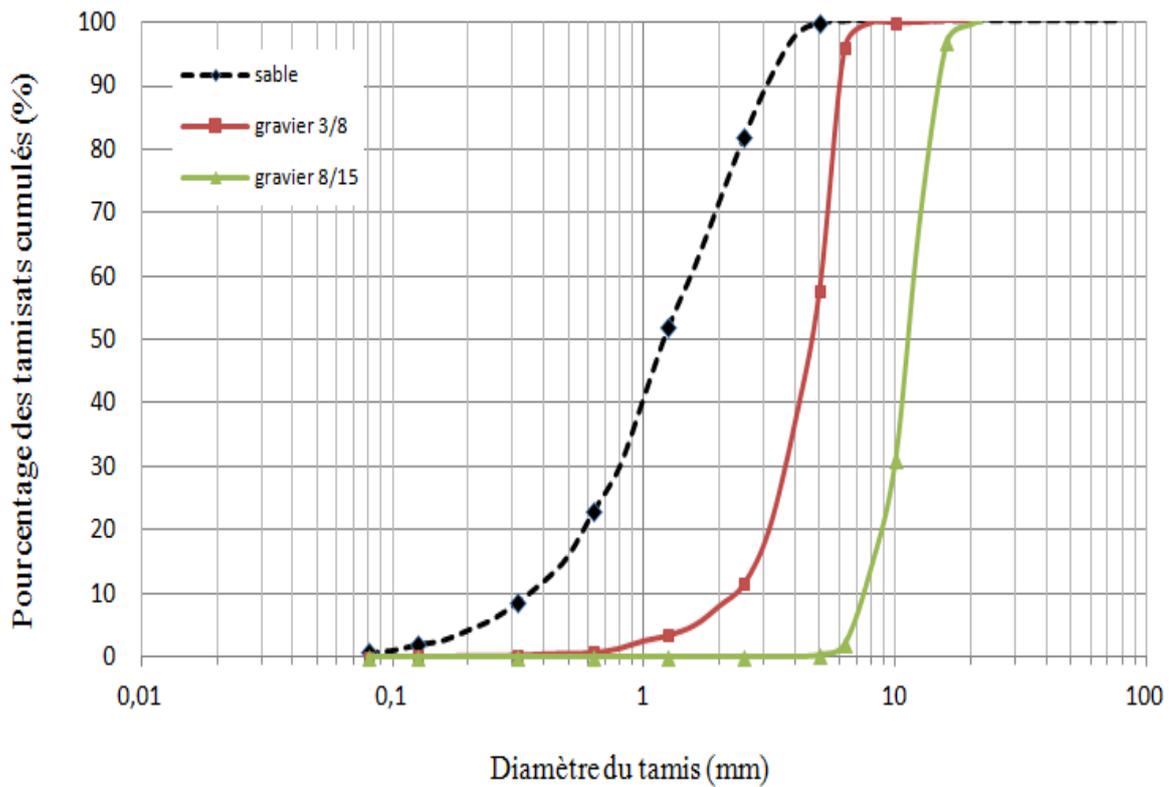


Figure 2.4 : Distribution granulométrique des granulats.

2.2.4 Les adjuvants

Un seul type d'adjuvant a été employé durant notre étude, un superplastifiant MEDAFLOW 30 fabriqué par l'entreprise GRANITEX, qui est un haut réducteur d'eau de la troisième génération coloré (brun clair) à base de polycarboxylate (PC), conforme à la norme EN 934-2. Sa densité est de 1,07, sa teneur en ions chlorures est inférieure à 0,1 g/l et il possède 30% d'extraits secs. Son dosage peut varier de 0,5 à 2,0% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

2.2.5 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est l'eau du robinet de notre laboratoire exempte d'impuretés.

2.3 Procédure de Formulation du BAP

Cette partie vise à calculer la quantité nécessaire pour chaque matériau de la gâchée, afin d'obtenir le béton qui aura les propriétés souhaitées. La méthode de formulation adaptée est celle proposée par Domone qui est à l'origine une méthode Japonaise, avec quelques modifications concernant la sélection de la quantité de sable dans le mortier, le rapport eau/liant ainsi que le rapport superplastifiant/liant. Ces paramètres sont optimisés d'une manière expérimentale afin d'aboutir à des valeurs de l'étalement au mini-cône et du temps d'écoulement au V-Funnel acceptables sur mortier.

Pour valoriser l'influence de la pouzzolane, comme ajout minéral sur le comportement rhéologique du BAP, nous avons fixé tous les autres paramètres, le rapport Sable/Mortier, le rapport Eau/Liant ainsi que le pourcentage en superplastifiant par rapport au liant.

2.3.1 Formulation et confectionnement du mortier

Les BAP possèdent un faible volume en gros granulats par rapport aux bétons vibrés, donc les propriétés du mortier sont les plus dominantes. Ce dernier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Pour que le mortier puisse être considéré comme autoplaçant, il doit avoir une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statiques et dynamiques. En terme de rhéologie, cela revient à abaisser le seuil de cisaillement du mortier, tout en maintenant la viscosité plastique du mélange par l'emploi d'un superplastifiant.

Nous avons pris les travaux de Boukendakdji [61] comme référence concernant l'optimisation du rapport sable/mortier (S/M). Nous avons fixé le rapport Sable/Mortier à 0,50, et le rapport E/C à 0,40 comme des paramètres de départ tout en faisant varier le rapport superplastifiant/Liant (SP/L) entre 1,2 et 2,2. Pour chaque dosage de superplastifiant, des mesures d'étalement et du temps d'écoulement ont été effectués sur leurs mortiers correspondants.

La sélection du rapport SP/L est ajustée par l'essai d'étalement au mini cône, dont le diamètre de la galette de mortier de référence (mortier sans ajout) obtenu doit être inclus dans une fourchette de valeur de 270 mm à 330 mm, et par l'essai de l'entonnoir en V

(V-Funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$ [62].

Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculés d'après l'exemple de composition de mortier donné à l'annexe B.

Dans nos essais nous avons opté pour la méthodologie de l'introduction des constituants et malaxage donnée par la figure 2.5 et qui se résume comme suit :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité « figure 2.6 »)
- Malaxer pendant une (1) minute avec la première quantité d'eau (70% Eau)
- Malaxer pendant une (1) minute avec le restant de l'eau de gâchage (30% Eau) mélangé avec le superplastifiant
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

La séquence de malaxage du mortier est mentionnée sur la figure 2.5.

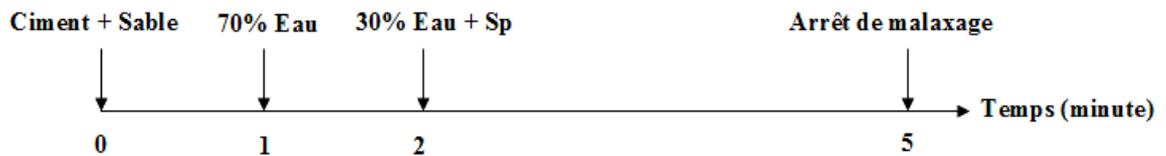


Figure 2.5 : Séquence de malaxage du mortier [62].



Figure 2.6 : Malaxeur de mortier.

2.3.2 Formulation et confectionnement du BAP

Le principe de formulation est de confectionner en premier un BAP de référence (c-à-d sans pouzzolane) en fixant les paramètres S/M, E/L, SP/L. Ensuite, pour étudier l'influence de la pouzzolane sur le comportement rhéologique du BAP, nous avons varié le pourcentage de substitution du ciment (par volume) par la pouzzolane naturelle de 10%, 15%, 20% et 25%, et cela pour chaque'une des finesses de la pouzzolane : 3500, 4200 et 5000 cm²/g.

Les proportions du mélange (ciment, gravier, sable, eau et superplastifiant) ont été calculés d'après la procédure illustrée dans l'annexe C.

Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur traditionnel d'une capacité de 40 litres (figure 2.8). La procédure de malaxage adoptée est celle illustrée dans la Figure 2.7 et qui se résume comme suit :

- Calculer l'eau efficace que l'on introduit dans le malaxeur en prenant en compte la teneur en eau et l'absorption des granulats ainsi que l'eau contenue dans l'adjuvant. La quantité d'eau efficace (Annexe C) est donnée par la formule suivante :

$$E_{eff} = E_{totale} - E_{teneur\ en\ eau} - E_{adjuvant} + E_{absorbée\ par\ granulats} \quad (2.1)$$

- Calculer les proportions du liant (ciment et pouzzolane), sable, gravier 3/8, gravier 8/15 et superplastifiant (voir Annexe C) ;
- Malaxer le gravier (3/8 et 8/15), sable, liant (ciment et pouzzolane) et ce pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (70% E_{eff}) ;
- Ajouter le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (30% E_{eff}) ;
- Malaxer pendant 5 minutes ;
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- Remalaxer pendant 30 secondes.

On note que, afin d'économiser le matériau béton, on utilise une quantité pour plusieurs essais. Après l'exécution du premier essai on doit remalaxer le mélange pour l'exécution de l'essai suivant.

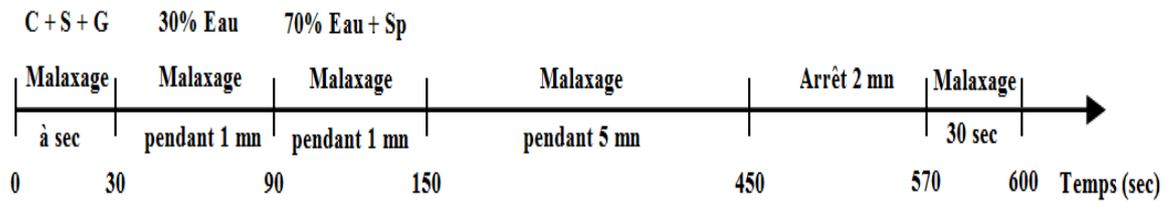


Figure 2.7 : Séquence de malaxage du BAP [62].



Figure 2.8 : Malaxeur de béton.

2.4 Caractérisation du mortier des BAP à l'état frais

Les mortiers ont les mêmes propriétés des BAP sur le plan rhéologique. Toutefois les BAP possèdent un faible volume en gros granulats par rapports aux bétons ordinaire ce qui implique l'utilité des essais de convenance sur ces mortiers.

Les essais de convenance les plus couramment utilisés sont :

2.4.1. Essai d'étalement au Mini-Cône

L'essai consiste à remplir un moule tronconique placé sur plaque métallique lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires, la moyenne est retenue. Pour un bon mortier auto-plaçant on doit avoir un diamètre d'étalement compris entre 270 mm et 330 mm, et il ne doit présenter ni ségrégation ni ressuage, ces deux derniers paramètres peuvent être détectée visuellement [62].

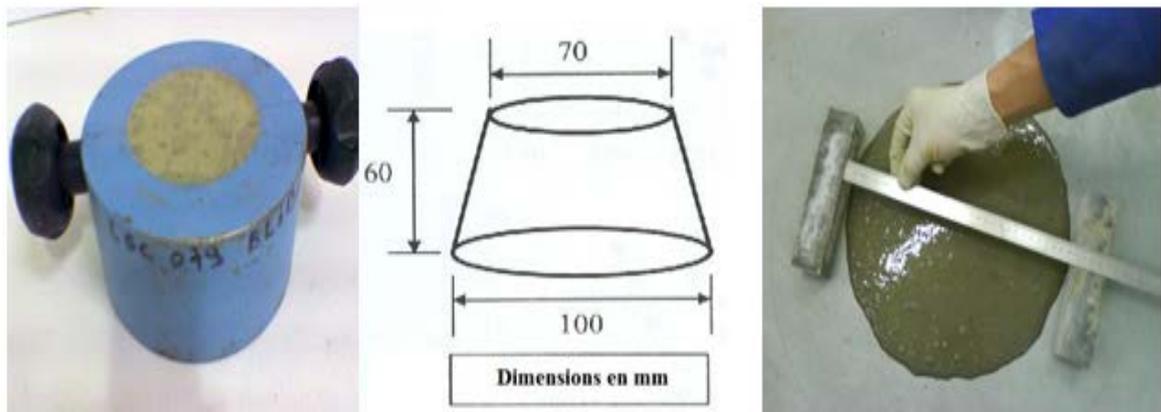


Figure 2.9 : Essai d'étalement pour mortier

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

L'essai consiste à remplir l'entonnoir de 1,1 litre de mortier, ensuite 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 de l'entonnoir. Le temps d'écoulement doit être compris entre 2 et 10 secondes [62]. On note que ce temps est en fonction de la vitesse d'écoulement qui est lui-même dépendant de la présence du blocage.

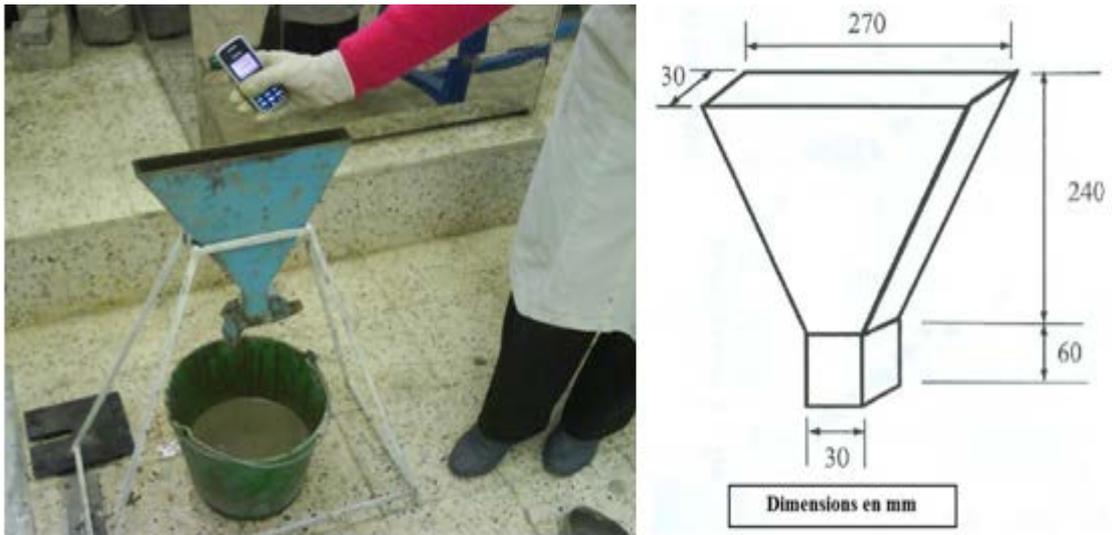


Figure 2.10 : Essai à l'entonnoir pour mortier.

2.5 Caractérisation du BAP à l'état frais

Plusieurs méthodes d'essais existent pour caractériser la performance du BAP à l'état frais. Les guides européens [2] prévoient de caractériser les BAP à l'état frais en prenant en compte les trois propriétés clés demandées, et proposent des essais à réaliser pour chacune d'elles (tableau 2.7) :

- La capacité de remplissage ;
- La capacité de passage ;
- La résistance à la ségrégation.

Tableau 2.7 : Essais relatifs aux BAP

Propriétés	Essais à réaliser
Capacité de remplissage	Cône d'Abrams
	V-Funnel
Capacité de passage	J-Ring
	L-Box
	U-Box
Résistance à la ségrégation	Essai au tamis de 5 mm

Les essais réalisés dans le cadre de cette étude se résument comme suit :

2.5.1 Essai d'étalement au cône

Cet essai est traditionnellement utilisé pour quantifier l'état de consistance des bétons ordinaires, en se basant sur la mesure de l'affaissement de béton sous l'effet de son propre poids. Cependant, l'affaissement étant toujours supérieur à 25 cm [12], on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute (Figure 2.11), ainsi que le temps nécessaire (T_{50}) à l'obtention du diamètre d'une galette de 500 mm de diamètre qui correspond à la période limitée entre le commencement de l'étalement de la galette (moment de soulèvement du cône) et le premier passage au cercle de 500 mm tracé sur la plaque [2]. Cette dernière valeur (T_{50}) donne une indication sur la viscosité du matériau, En général, des valeurs élevées de T_{50} traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Et peut aussi donner des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange, sa capacité à s'écouler en milieu non confiné et sans obstacle.

Des valeurs cibles de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen sont conseillées d'un BAP [63]. Toutefois les recommandations Européennes proposent une classification des BAP en fonction des fourchettes d'étalement et une autre en fonction du temps d'étalement donnant une indication sur la viscosité. Ces classements sont donnés par le tableau 2.8 et 2.9. Les recommandations européennes proposent un T_{50} compris entre 2 et 5 secondes pour un BAP [64].

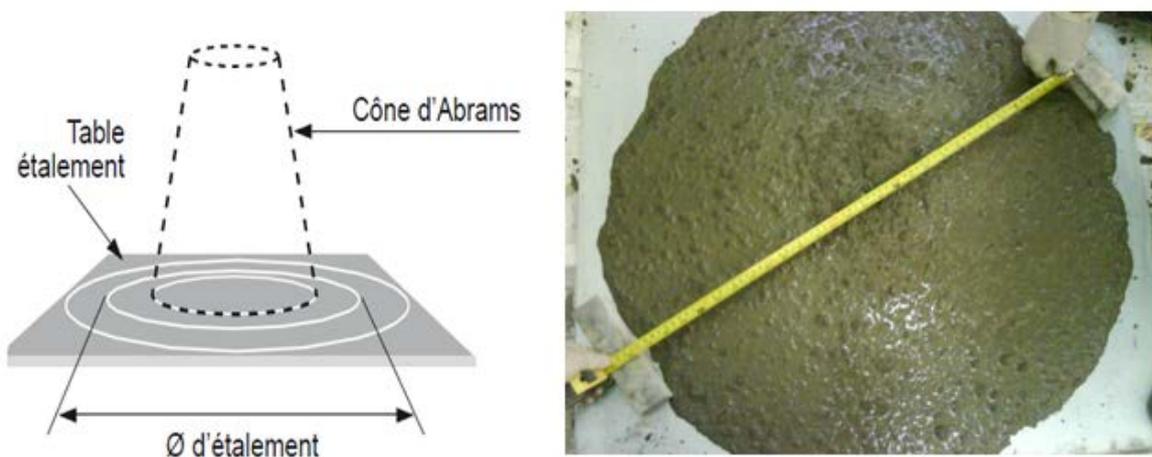


Figure 2.11 : Essai au cône d'Abrams

Tableau 2.8 : Classe de consistance des BAP [2]

Classe	Etallement (mm)	Domaine d'utilisation
SF1	550 – 650	<ul style="list-style-type: none"> • Structure non ou peu ferrillées. Béton coulé à partir du haut (ex. les dalles) • Coulage par système de pompage du BAP (ex. tunnels) • Petites section (ex. les piles et les fondations)
SF2	660 – 750	La majorité des applications
SF3	760 – 850	<ul style="list-style-type: none"> • Applications verticales • Structures trop ferrillées • Coulage à partir du dessous du coffrage • Structures de forme complexe

Tableau 2.9 : La classe de viscosité donnée par le temps T_{50} [2]

Classe	T_{50} (s)	Caractéristique
VS1	≤ 2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bonne capacité de remplissage, ▪ Sensibles au phénomène de ségrégation et ressuage.
VS2	> 2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bonne résistance à la ségrégation, ▪ Utile pour limiter la pression de coffrage, ▪ Un faible niveau de finition, ▪ Retard de reprise entre les couches successive.

Des observations complémentaires peuvent aider à appréhender certaines propriétés à l'état frais des bétons autoplaçants :

- Un ressuage peut être détecté si de l'eau est présent en grande quantité sur les bords de la galette,
- En traçant à la truelle des lignes dans la 'galette', on peut vérifier si le béton se referme bien, ce qui est synonyme de bon comportement,

- La fluidité du béton peut être évaluée en mesurant les temps de passage du béton aux diamètres 50 et 60 cm durant un écoulement au cône,
- Une forme bombée de la 'galette' traduit un effet de voûte, ce qui peut nuire à l'homogénéité du béton.

2.5.2 Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

Cet essai (Fig. 2.12) consiste à mesurer le temps d'écoulement d'un échantillon de 12 litres au travers l'orifice de l'entonnoir après une durée de repos de 60 sec. L'essai permet d'évaluer la fluidité du béton (plus le temps d'écoulement est court, plus le béton est fluide) mais également sa stabilité lors de l'écoulement (moins le béton est stable, plus l'écoulement est perturbé par les collisions inter-granulaires et plus la durée d'écoulement est longue).



Figure 2.12 : Entonnoir en V (V-Funnel) pour les BAP

Le temps d'écoulement du BAP à l'entonnoir noté T_{V-F} doit être généralement inférieur à 12 secondes. Quelques recommandations [64] proposent un temps compris entre 6 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante. Le guide européen propose une classification de la viscosité pour l'essai d'entonnoir en V (Tableau 2.10). On note que les classes VF1 et VF2 (tableau 2.10) correspondent aux classes VS1 et VS2 (tableau 2.9) respectivement.

Tableau 2.10 : Classes de viscosité donnée par le temps T_{V-F} [2]

Classe	T_{V-F} (s)	Caractéristique
VF1	≤ 8	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bonne capacité de remplissage, ▪ Sensibles au phénomène de ségrégation et ressuage.
VF2	9 – 25	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bonne résistance à la ségrégation, ▪ Utile pour limiter la pression de coffrage, ▪ Un faible niveau de finition, ▪ Retard de reprise entre les couches successive.

2.5.3 Essai à la boîte en L (L-Box test)

L'objectif visé par cet essai (Figure 2.13) est de tester la mobilité du béton de volume de 12 l en milieu confiné, d'évaluer le taux de blocage du béton lors du passage entre les armatures d'acier [64].

Le principe de l'essai est le suivant :

- La partie verticale est entièrement remplie de béton ;
- On laisse reposer pendant une minute (pour vérifier s'il y a de la ségrégation) puis on soulève la trappe (représentant les armatures en acier du béton armé) et on laisse le béton s'écouler à travers le ferrailage tout en mesurant le temps d'écoulement pour arriver aux distances 200 et 400 mm. Ces temps sont notés T_{20} et T_{40} successivement ;
- lorsque le béton ne s'écoule plus dans la partie horizontale, on mesure les deux hauteurs H_1 et H_2 . On peut donc calculer le rapport H_2/H_1 exprimant le taux de remplissage. Ce rapport doit être supérieur à 0,8 [2]. Les deux capacités d'écoulement et la résistance à la ségrégation, peuvent être détectées visuellement. Si on observe un résidu de granulat dans la partie verticale du L (avant les barres de ferrailage), on pourra conclure qu'il y a soit un blocage soit une ségrégation [64].

Concernant les marges de valeur des temps T_{20} et T_{40} certains auteurs recommandent des valeurs inférieures à 1.5 secondes pour T_{20} et inférieures à 3.5 secondes pour T_{40} afin de rester dans un domaine autoplaçant [65].

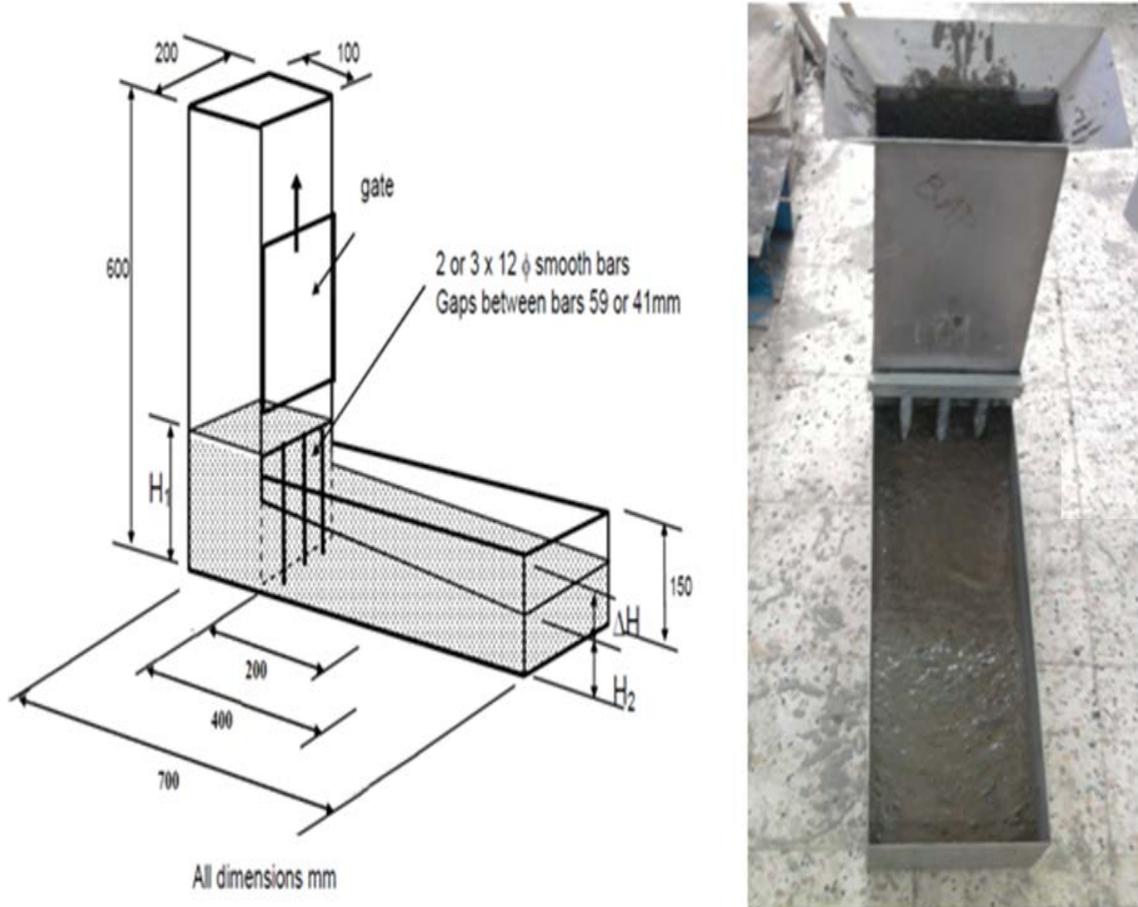


Figure 2.13 : Essai à la boîte en L.

2.5.4 Essai à la boîte en U

Dans ce test, on mesure par la hauteur que peut atteindre un béton après l'écoulement à travers un obstacle. Le principe est sensiblement le même que pour la boîte en L. Le dispositif d'essai (Figure 2.14) se compose de deux compartiments R_1 et R_2 , séparés par une grille d'armature et une trappe coulissante.

L'essai consiste à verser le béton dans la partie R_1 de façon continue, on ouvre la trappe laissant passer le béton à travers la grille d'armature, jusqu'à l'arrêt de l'écoulement (équilibre atteint) et on mesure la hauteur de remplissage (h_2) de béton dans la partie R_2 . Un béton est considéré comme autoplaçant si la différence de hauteur (h_1-h_2) se rapproche de zéro [65]. En plus EFNARC [65] recommande une fourchette de valeur pour la hauteur de remplissage (h_2) variante de 270 mm à 300 mm.

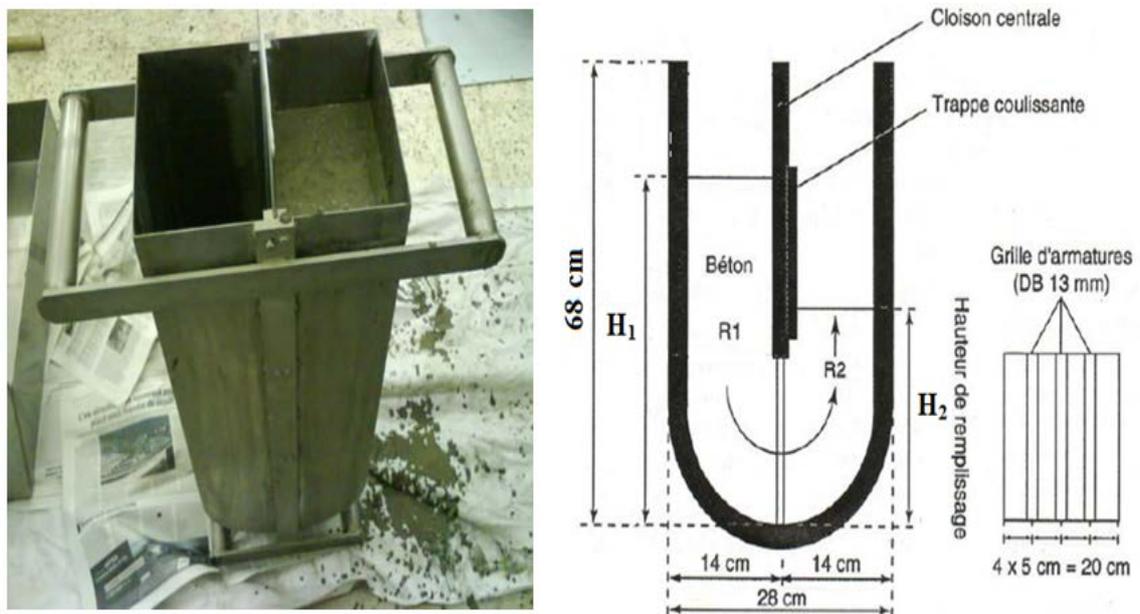


Figure 2.14 : Essai à la boîte en U.

2.5.5 Essai à la couronne J (J-Ring test)

Cet essai permet de vérifier la capacité d'écoulement du BAP sans présence de ségrégation à travers les armatures ainsi que la capacité de remplissage. Le principe est de mesurer les paramètres suivant : l'étalement, le temps d'écoulement T_{50j} et le blocage qui est caractérisé par la différence de hauteur B_j . L'essai consiste donc à faire écouler le béton à travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un ensemble de barre d'armature de Φ 16 à 18 mm, soudé à un anneau métallique de 300 mm de diamètre (Fig. 2.15). Ces barres sont disposées avec un espacement régulier d'environ deux fois et demi leur diamètre. Dans cet essai un bon BAP c'est celui qui s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

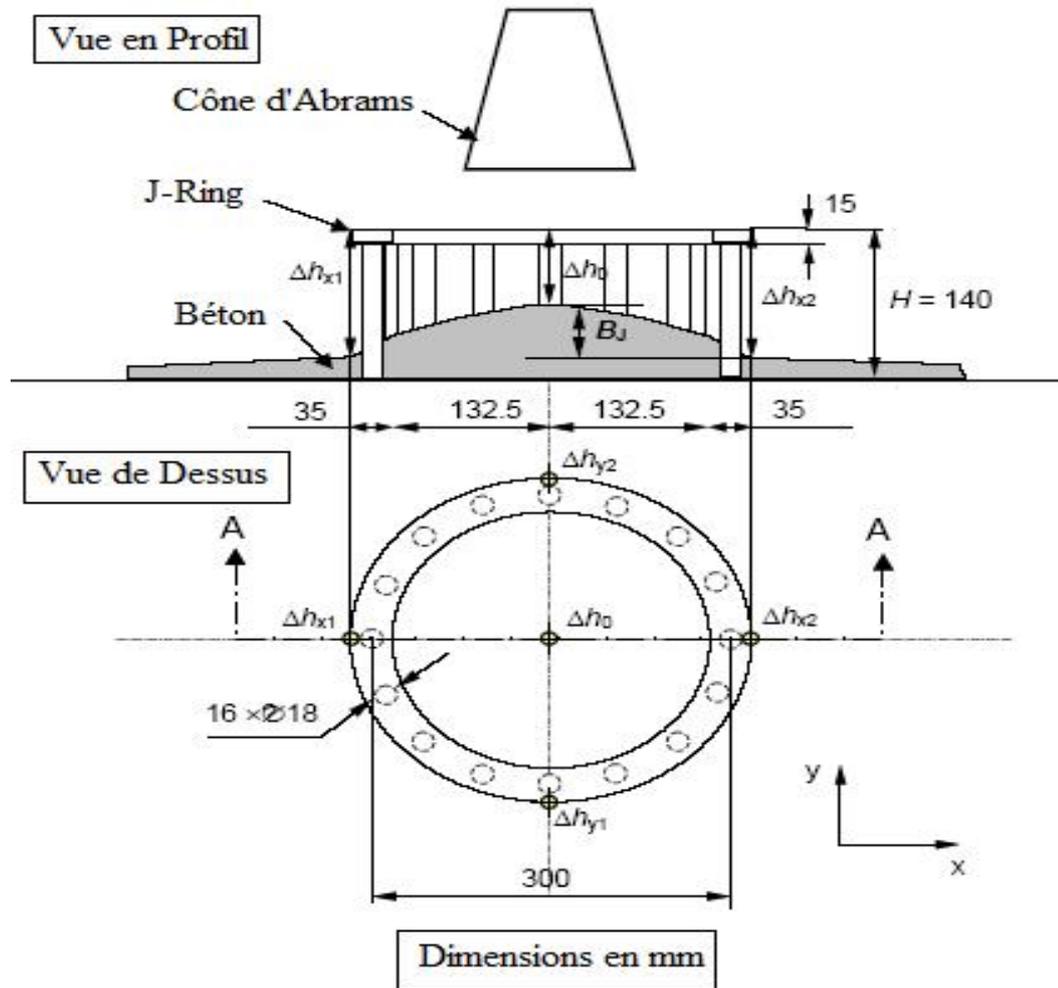


Figure 2.15: Les dimensions du J-Ring et les positions de mesure de différentes hauteurs.

Les paramètres mesurés sont :

- a. **Temps d'écoulement T_{50J}** : Le temps d'écoulement T_{50J} est la période entre le moment où le cône est soulevé et le moment où le BAP touche le cercle de diamètre 500 mm tracé sur la plaque métallique.
- b. **Étalement S_J** : défini par la moyenne entre la valeur d'étalement maximal et sa perpendiculaire.

$$S_J = \frac{(d_{\max} + d_{\text{perp}})}{2} \quad (2.2)$$



Figure 2.16: mesure d'étalement en présence du J-Ring.

- d. Différence d'Hauteurs B_j** : elle est mesurée par la différence de hauteur du BAP à l'intérieure et l'extérieure du j-Ring (Fig. 2.15 et 2.17), cela permet d'évaluer le taux du blocage. La valeur maximale du B_j proposée par les recommandations européennes est de 10 mm [65]. B_j est calculée avec la formule suivante :

$$B_j = \frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{x3} + \Delta h_{x4})}{4} - \Delta h_0 \quad (2.3)$$

Avec Δh_0 est la profondeur mesurés au centre et à partir du sommé du J-Ring.

Δh_{xi} sont les profondeurs mesurés selon l'axe x à partir du sommé du J-Ring.

Δh_{yi} sont les profondeurs mesurés selon l'axe y à partir du sommé du J-Ring.

Les profondeurs Δh_0 , Δh_{xi} , Δh_{yi} sont illustrées par la figure 2.17.



Figure 2.17: Mesure des hauteurs à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring.

2.5.6 Essai de stabilité au tamis

L'essai vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation statique (Figure 2.18). Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier [12].

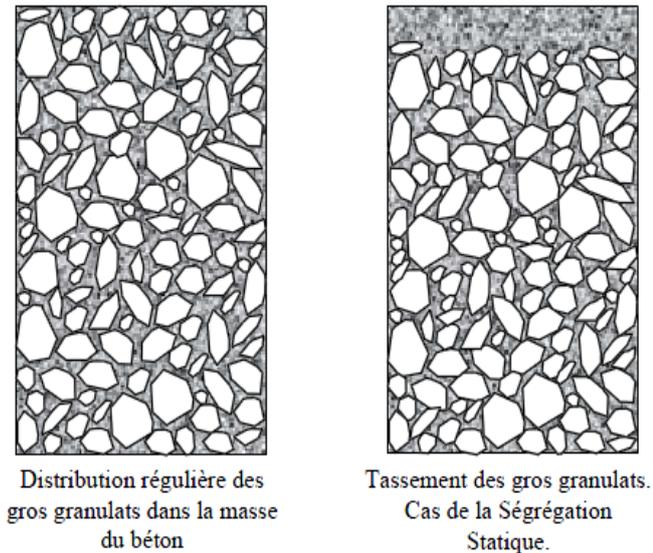


Figure 2.18: Représentation du cas de ségrégation statique dans un volume de béton.

Cet essai est proposé dans les Recommandations Provisoires de l'AFGC [17]. Un échantillon de 10 l de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser 4,8 kg (tolérance $\pm 0,2$ kg) de l'échantillon sur un tamis de 5 mm (Figure 2.19).

Après 2 min d'attente, le pourcentage de laitance qui est passée au travers du tamis est calculé selon l'expression :

$$\Pi = \frac{P_{\text{laitance}} * 100}{P_{\text{échantillon}}} \quad (2.4)$$

Avec :

$P_{\text{échantillon}}$ est le poids d'une partie d'un échantillon de béton mis au repos versé sur le tamis de 5 mm.

P_{laitance} est le poids de la laitance passant par le tamis de 5 mm.



Figure 2.19 : Essai au tamis.

Le critère de stabilité de cet essai est [65] :

- $0 \leq \Pi \leq 15\%$, alors la stabilité est satisfaisante
- $15 < \Pi \leq 30\%$, la stabilité est critique
- $\Pi > 30\%$, la stabilité est très mauvaise.

2.6 Récapitulatif du programme des essais réalisés

2.6.1 Essais sur mortier

L'objectif des essais sur mortier formulé par la méthode japonaise et modifié par Domone vise à trouver le dosage optimal du superplastifiant servant pour la formulation d'un BAP, donc le principe consiste à varier le dosage du superplastifiant de 1,2% à 2,2% avec un pas de 0,2%, et tout en conservant la valeur du E/L et S/M fixe, par la suite on doit mesurer les valeurs d'étalement au mini-cône et de temps d'écoulement au V-Funnel (spécifique au mortier) ce qui correspond à 12 essais à effectuer. Les valeurs d'étalement et de temps d'écoulement doivent donc être comprises dans la fourchette des valeurs admissibles [62] afin de le juger comme un mortier auto-plaçant et le dosage de superplastifiant donnant le temps d'écoulement au V-Funnel le plus bas avec un étalement correcte sera qualifié comme le dosage optimal. La procédure est illustrée dans la figure 2.20.

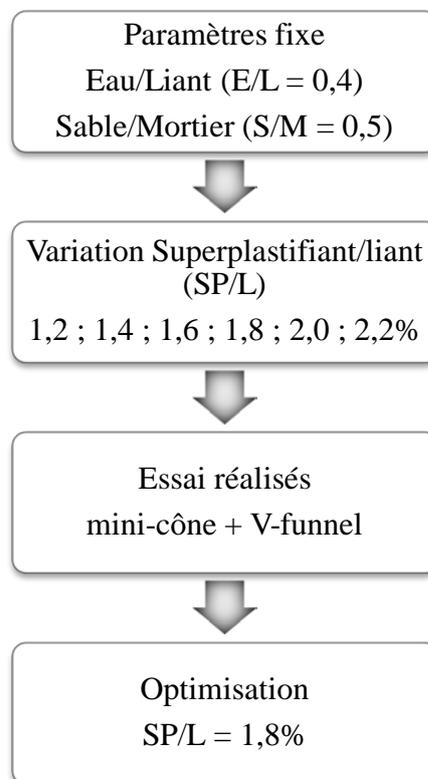


Figure 2.20 : Diagramme des essais réalisés sur mortier.

2.6.2 Essais sur béton

Le but visé dans cette partie est de chercher le dosage optimal et la finesse optimale de la PZN permettant de confectionner un béton qui vérifie les conditions exigées des BAP [2]. Donc le principe consiste à effectuer 5 essais de convenance des BAP pour chacune des trois finesesses : 3500 cm²/g, 4200 cm²/g et 5000 cm²/g, et chacun des pourcentages de substitution du ciment par la PZN c-à-d : 10%, 15%, 20% et 25%, pour cela il est jugé utile de fixer en premier lieu la finesse et de varier ensuite le dosage de la PZN. Donc le nombre total d'essais effectués est 60 essais, et les paramètres qui varient en fonction de ces deux derniers (finesse et dosage de la PZN) paramètres sont décrits dans la figure 2.21.

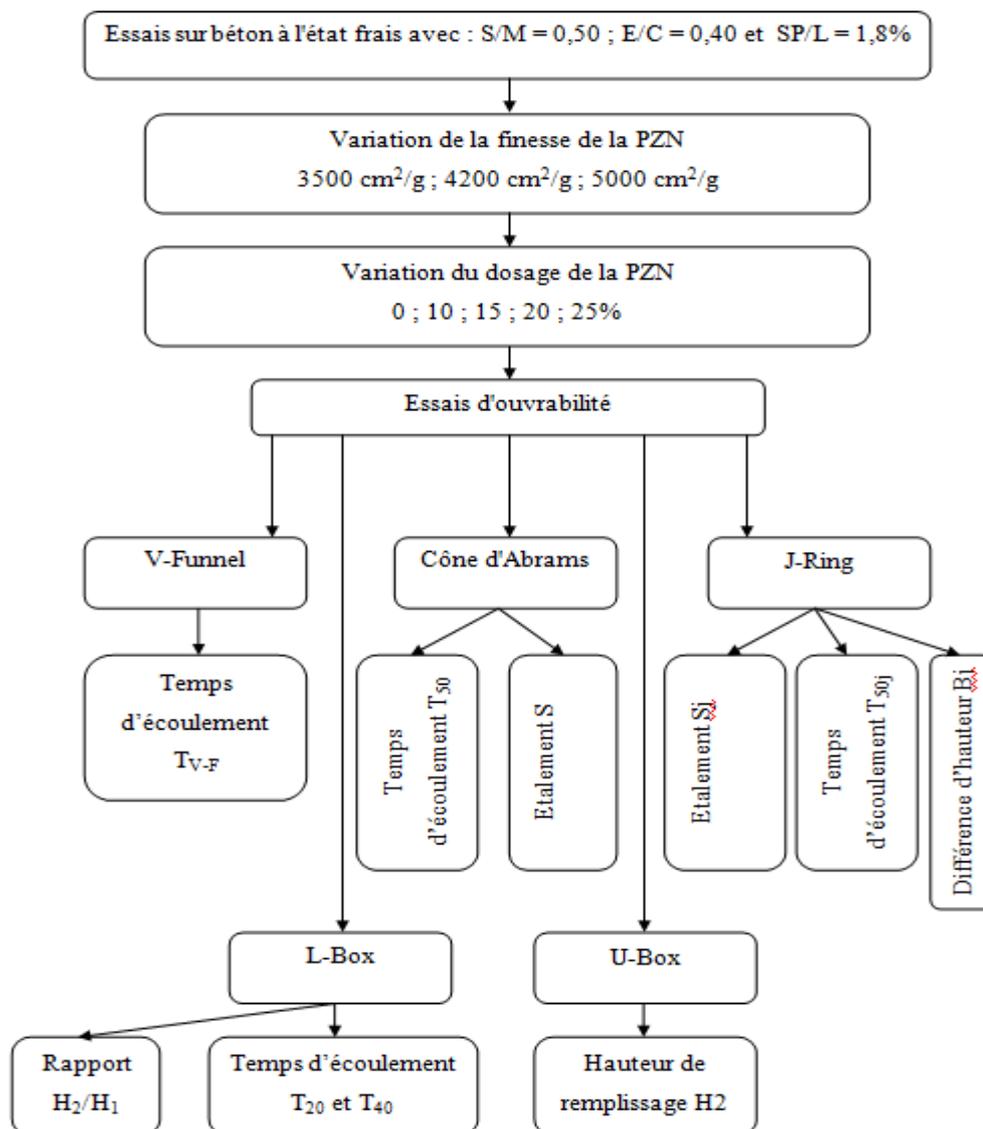


Figure 2.21 : Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état frais.

CHAPITRE 3

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

3.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus pour les différents essais réalisés. Nous nous intéresserons tout d'abord aux essais effectués sur mortier afin d'optimiser le rapport SP/L que l'on pourra utiliser par la suite, dans la composition du béton autoplaçant. L'étape suivante concernera l'étude des résultats des essais effectués sur le BAP après avoir fixé tous les paramètres avec pour seule variable le pourcentage de la pouzzolane par rapport à la quantité de ciment. Ensuite, un autre paramètre va être mis en question qui est l'influence de la variation de la finesse de la pouzzolane naturelle sur l'ouvrabilité et les caractéristiques rhéologiques du béton frais.

3.2 Optimisation de dosage du superplastifiant

Dans le BAP, la phase du mortier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, la stabilité globale du béton. Les propriétés du mortier sont semblables à celle du BAP lui-même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'assurer la non ségrégation du béton durant l'écoulement. En effet, pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume du sable est fixé à 50% du volume total de mortier [61]. L'optimisation des dosages des constituants de la pâte de ciment est donc nécessaire pour assurer que le mortier obtenu (en associant le volume du sable) satisfasse les critères d'ouvrabilité de l'essai d'étalement au cône d'une part, et de l'essai de l'écoulement à l'entonnoir en V d'autre part.

Le principe vise à déterminer le dosage optimal du superplastifiant (SP/L) nécessaire pour la formulation du BAP, en étudiant la variation de l'étalement au mini-cône, ainsi que le temps d'écoulement au V-Funnel du mortier en fonction du dosage du superplastifiant (1,2 ; 1,4 ; 1,6 ; 1,8 et 2%), et avec un rapport de S/M fixé à 0,5 et E/L fixé à 0,4 (par poids). Les différentes compositions des mortiers obtenues, en fonction du rapport SP/L sont présentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition des mortiers pour différentes valeurs de SP/L

Compositions	Unité	MOR 1	MOR 2	MOR 3	MOR 4	MOR 5	MOR 6
Ciment	kg/m ³	686,90	686,90	686,90	686,90	686,90	686,90
Sable	kg/m ³	1287,60	1287,60	1287,60	1287,60	1287,60	1287,60
Eau	kg/m ³	261,40	260,40	259,50	258,50	257,50	256,60
Superplastifiant	%	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	2,2
Superplastifiant	kg/m ³	8,20	9,60	11,00	12,40	13,70	15,10

3.2.1 Étalement au mini cône pour les mortiers

La figure 3.2 montre l'effet du superplastifiant sur l'étalement des mortiers au mini cône. On remarque que chaque dosage de superplastifiant permet d'atteindre des valeurs d'étalement acceptables selon Domone et Jin [62]. Par contre, pour les dosages de superplastifiant de 2% et 2,2% un grand ressueage et une grande ségrégation visibles à l'œil nue sont observés montrant ainsi un dosage de saturation pour le mortier (Figure 3.1).



Figure 3.1 : Présence de ressueage dans le mortier pour des valeurs de SP/L de 2% et 2,2%.

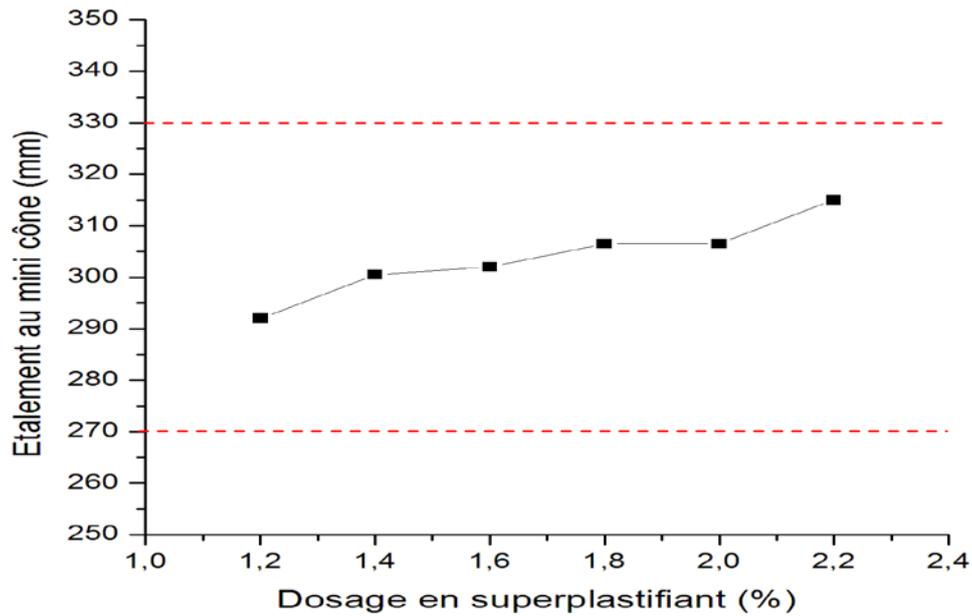


Figure 3.2 : Variation d'étalement en fonction du dosage du superplastifiant

3.2.2 Temps d'écoulement à l'entonnoir en V-Funnel pour mortiers

La figure 3.3 montre l'effet du superplastifiant sur le temps d'écoulement des mortiers en utilisant l'entonnoir en V pour mortiers. Le dosage 1.8% a montré le temps d'écoulement le plus faible. Toutes les valeurs des temps d'écoulement dans le cas d'utilisation du superplastifiant sont comprises dans l'intervalle de 2 à 10 secondes proposé par Domone et Jin [62].

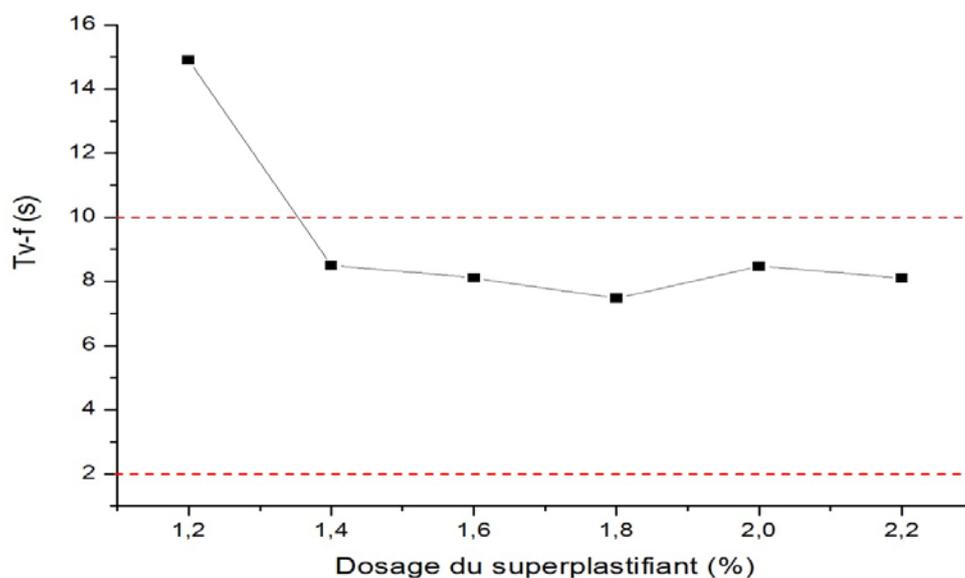


Figure 3.3 : Variation du temps d'écoulement du mortier au V-Funnel en fonction du dosage du superplastifiant.

D'après les résultats donnés par les deux figures 3.2 et 3.3 on peut conclure que le dosage optimale du superplastifiant est de 1,8%. Ce choix peut être argumenté par le fait qu'il donne des valeurs d'étalements au mini cône et de temps d'écoulement au V-Funnel acceptables sans présence de ressuage ni de ségrégation. En plus, il présente un dosage proche du dosage de saturation. C.à.d toute augmentation de dosage en superplastifiant au-delà de 1,8% du poids de ciment n'a plus d'effet important sur la rhéologie du mortier alors, il y a une saturation du système par le superplastifiant, ce qui provoque une augmentation des frottements entre les granulats et diminue la cohésion du mélange, on assistera alors à une hétérogénéité du mélange. Par contre, un dosage en SP de 1,2% ne permet d'atteindre des valeurs de temps d'écoulement acceptables, ceci est probablement due à sa faible capacité de défloculer convenablement l'empilement des grains de ciment.

D'après Bethmont [66], le dosage de saturation est celui au dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la rhéologie du mélange. Les superplastifiants sont généralement utilisés à un dosage proche du dosage de saturation afin de limiter le phénomène de perte de l'ouvrabilité dans le temps.

3.3 Effet de la pouzzolane naturelle sur l'ouvrabilité du BAP

Le principe consiste à analyser l'effet de la pouzzolane naturelle (PZN) sur l'ouvrabilité d'un BAP de référence (sans ajout) à l'aide des différents essais cités dans le chapitre 2. Ceci permet d'étudier la variation des paramètres d'ouvrabilité en fonction du dosage du BAP en pouzzolane ainsi que sa finesse. Il est important dans cette partie de contrôler surtout la ségrégation, le blocage et le ressuage. Le tableau 3.2 donne la composition des cinq (5) bétons testés avec comme béton de référence le BAP1 qui contient 0% de pouzzolane. Les différentes proportions ont été calculées selon la procédure donnée en annexe C en prenant les valeurs des paramètres nécessaires (S/M, E/L, SP/L) pour le confectionnement du mortier auto-plaçant comme des valeurs fixes.

On note que pour chaque finesse de la PZN ($3500 \text{ cm}^2/\text{g}$, $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$ et $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$), on doit confectionner quatre mélanges de béton correspondant aux quatre taux de substitution de ciment (par volume) par la PZN (10%, 15%, 20% et 25%) dont le dosage en poudre (Ciment+PZN) varie de 485 à $494 \text{ kg}/\text{m}^3$ (substitution par volume de ciment).

Tableau 3.2 : Composition des BAP testés.

		BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5
Ciment (kg/m ³)		494	445	420	395	371
PZN	Taux de substitution (%)	0	10	15	20	25
	Quantité (kg/m ³)	0	46	68	91	114
Gravier (3/8) (kg/m ³)		245	245	245	245	245
Gravier (8/15) (kg/m ³)		490	490	490	490	490
Sable (kg/m ³)		921	921	921	921	921
Eau (kg/m ³)		198	198	198	198	198
Superplastifiant	SP/L (%)	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
	Quantité (kg/m ³)	8.89	8,82	8,79	8,75	8,72

3.3.1 Étalement et Temps T₅₀ au cône d'Abrams

L'essai d'étalement permet d'évaluer la capacité de remplissage des BAP sous leurs propre poids et en absence d'obstacle. Les données concernant l'essai au cône d'Abrams sont données aux tableaux 3.3 et 3.4. Les figures 3.4 et 3.5, présentant la variation de l'étalement et du temps T₅₀ du béton en fonction de la teneur en PZN ainsi que sa finesse.

Tableau 3.3 : Valeurs de l'étalement au cône d'Abrams

PZN%	Finesses (cm ² /g)			Étalement Admissible (mm)
	SSB 3500	SSB 4200	SSB 5000	
	Étalement (mm)			
0	764	764	764	650 - 800
10	743	691	668	650 - 800
15	711	668	646	650 - 800
20	692	632	623	650 - 800
25	687	625	586	650 - 800

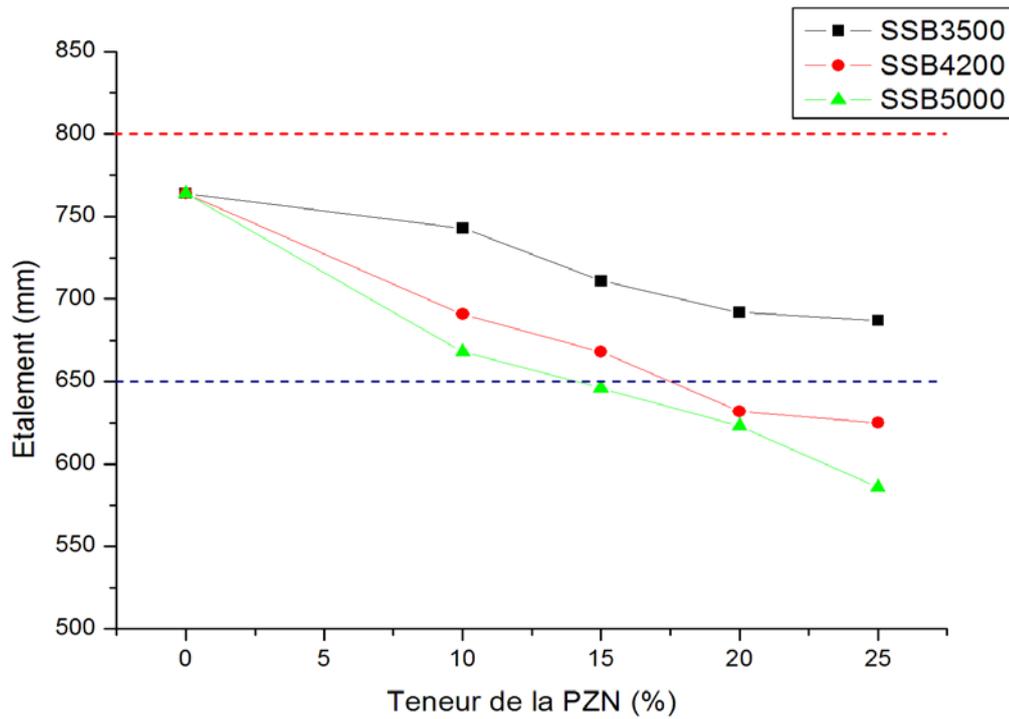


Figure 3.4 : Etalement en fonction de la teneur en PZN et sa finesse.

Tableau 3.4 : Valeurs de temps d'étalement T_{50} au cône d'Abrams.

PZN%	Finesses (cm ² /g)			T ₅₀ Admissible (s)
	SSB 3500	SSB 4200	SSB 5000	
	Temps d'étalement T ₅₀ (s)			
0	2,67	2,67	2,67	2 - 5
10	3,5	4,8	5,2	2 - 5
15	3,35	4,75	4,9	2 - 5
20	4,31	5,3	5,47	2 - 5
25	4,45	5,8	6,85	2 - 5

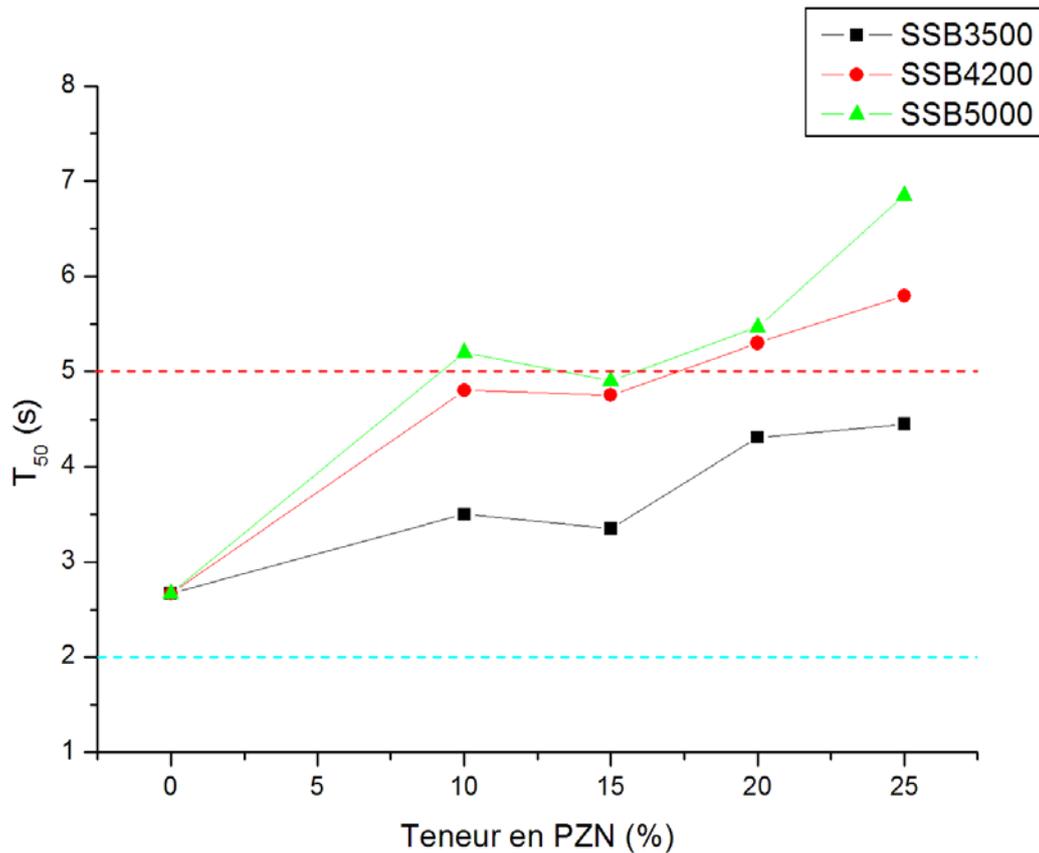


Figure 3.5 : Temps d'étalement en fonction de la teneur en PZN et sa finesse.

3.3.1.1 Effet de la PZN

Pour la finesse de $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$, on remarque que l'étalement de la galette du béton diminue de 764 mm à 687 mm pour un taux de substitution de 0% et 25% respectivement, tout en restant dans la marge des valeurs correspondantes au BAP [64] (c-à-d entre 650 mm et 800 mm). Ce qui correspond à une diminution de 10%. La diminution de l'étalement est due à l'absorption de l'eau plus élevée de la PZN. En plus, on peut remarquer à partir de la figure 3.5 qu'un taux de substitutions de 15% donne la plus faible valeur de T_{50} (3,35 s) avec un étalement acceptable de 711 mm. Donc ce cas, on peut conclure que le taux de substitution de 15% de ciment par la PZN peu être considéré comme un dosage optimal qui permet de vérifier la capacité de remplissage à l'état libre en absence d'obstacles.

Il existe pas mal de travaux antérieurs qui ont permis d'analyser et d'interpréter l'influence de la PZN comme substituant du ciment sur le besoin en eau. Cela, nous permet de confirmer ou non la perte d'ouvrabilité au cône d'Abrams causée par cet ajout, comme il a été montré par les résultats de nos travaux. D'après Turanli et al. [67], l'augmentation de la demande en eau est interprétée par la nature microporeuse et la forme angulaire des particules de la PZN. La forme arrondie des particules de la PZN avec des surfaces rugueuses donne une capacité d'absorption plus importante d'eau dans les pâtes de ciment. En plus, l'existence du minéral zéolite fait incorporer les molécules d'eau dans leur structure poreuse interne.

Kaid et al. [68], ont trouvé que l'incorporation de la PZN provoque une augmentation du dosage en eau à consistance égale d'un béton plastique. Cette augmentation atteint 5% et 9% pour un taux de substitution de 10% et 20% en PZN, respectivement. En plus, ils ont remarqué que le besoin en eau diminue de 15% pour les bétons à base de 20% de PZN et 1% de superplastifiant (SP) par rapport au béton témoin sans SP. En effet, les BAP nécessitent une faible contrainte de seuil de cisaillement (τ_0) pour qu'ils puissent s'écouler sous le seul effet de leur poids propre, d'où l'utilité d'utilisation d'un superplastifiant ou l'augmentation de son dosage [69].

Turanli et al. [70], ont constaté que l'augmentation du taux de substitution du ciment par la PZN de 35% à 55% augmente le dosage d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale du mortier (110 ± 5 mm) d'environ 14%.

Siad [60] a étudié des BAP à base de PZN pour trois classes de résistance 30, 50 et 70 MPa, et des taux de substitutions du ciment par la PZN de 50, 33 et 13%, avec un étalement constant de 660 ± 10 mm. Il a constaté que plus la teneur en PZN augmente plus le rapport E/L augmente (de 0,4 à 0,7%) et plus le rapport SP/L diminue (de 2 à 0,7%).

Uzal et Turanli [71], ont remarqué que l'incorporation de la PZN dans une proportion de 55% du poids de ciment portland augmente le rapport E/L nécessaire pour avoir une consistance normale d'environ 50% par rapport au ciment seul.

Diamantonis et al. [72], ont observé que la substitution du ciment portland par la PZN (20% à 40%) augmente la valeur de seuil d'écoulement des BAP d'une manière

significative en fonction du taux de substitution ce qui peut être traduit par un étalement plus faible que celui du BAP sans ajout. Ferraris et Delarrard [66], ont trouvé une bonne corrélation entre le seuil de cisaillement extrapolé par le modèle de Herschel Bulkey et l'étalement, dans le sens où le diamètre d'étalement est inversement proportionnel à la valeur du seuil d'écoulement (τ_0). Donc, ceci aide à confirmer les travaux de Diamantonis et al. [72], et par conséquent nos résultats.

Concernant le temps d'écoulement, on peut remarquer sur la figure 3.5 que les valeurs de T_{50} correspondante à la finesse $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ sont inférieures à la limite de 5 secondes exigée pour les BAP [64]. L'augmentation du taux de substitution du ciment par la PZN de 0 à 25% augmente le temps T_{50} de 2,6 secondes à 4,5 secondes. Diamantonis et al. [72], ont montré que la substitution du ciment portland par la PZN (20% et 40%) augmente légèrement la valeur de la viscosité plastique des BAP, ce qui implique une augmentation de la valeur de T_{50} . Certains chercheurs ont montré une bonne corrélation entre le temps d'étalement T_{50} et la viscosité obtenue à l'aide d'un rhéomètre [66,73].

Gesoğlu et al. [39], ont aussi remarqué que l'emploi des ajouts minéraux augmentent légèrement la valeur de T_{50} et principalement dans le cas des BAP à base de fumée de silice.

Boukendakdji et al. [61], ont utilisé la même méthode de formulation et presque les mêmes valeurs des paramètres ($S/M = 0,5$; $E/L = 0,4$) sauf que le type d'ajout employé et le laitier d'El-Hadjar d'une seule finesse ($3500 \text{ cm}^2/\text{g}$), et avec le même type de superplastifiant (MEDAFLOW 30 à base de polycarboxylate) mais à dosage différent ($SP/L = 1,6$). Il a été observé que la substitution du ciment par le laitier à raison de 0 ; 10 ; 15 ; 20 et 25% donne des valeurs d'étalement acceptable qui varient de 630 à 787 mm et un temps d'étalement T_{50} qui varie entre 0,66 et 1,25 s. Le dosage optimal du laitier est observé à 15% qui donne un bon BAP sans présence de ségrégation. Donc en comparaison avec ces résultats avec celle de nos, on peut remarquer que les valeurs d'étalement sont comparables mais il reste à signaler que le temps T_{50} correspondant au laitier est plus faible que celui correspondant au PZN. En plus, il a été remarqué que l'influence des deux ajouts sont réciproque sur l'ouvrabilité c-à-d, le laitier améliore la fluidité contrairement à la PZN. L'effet de laitier a été interprété par les caractéristiques microscopiques de ses grains à

surfaces vitreuses lisses à faible taux d'absorption ce qui permet le glissement intergranulaire dans le mortier.

Liu [57], a trouvé que la substitution de ciment par les cendres volante fait diminuer le dosage en superplastifiant mais augmente le dosage en eau nécessaire pour maintenir une capacité de remplissage constante des BAP dont l'étalement visé est de 700 ± 50 mm. Ces résultats ont été interprétés par la forme sphérique des particules des cendres volantes qui peuvent disperser les particules du ciment [55]. En comparant ces résultats avec ceux de notre on peut constater que la PZN peut avoir un effet similaire aux cendres volante étudié par Liu [57] sur la capacité de remplissage des BAP, du fait que la PZN absorbe plus d'eau qui causera une perte d'ouvrabilité, mais l'effet de PZN sur le dosage en superplastifiant à ouvrabilité constante et avec l'augmentation de dosage en eau ont peut pas le discuter du fait qu'il nécessite un autre plan d'expérimentation, et qui ne se conforme pas à celui de notre.

Uysal et Sumer [74], ont analysé la capacité de remplissage (essai d'étalement) des BAP à base de différents ajouts minéraux (le calcaire, la cendre volante, le laitier, la poudre de basalte et la poudre de marbre) comme substituant du ciment (par poids) et dont la quantité du liant est fixée à 550 kg/m^3 . Il a été constaté que toutes les BAP ont montré des valeurs d'étalement satisfaisant dont la fourchette de valeur et de 690–750 mm, ce qui est une indication d'une très bonne déformabilité. Les BAP à base des cendres volante ou de laitier ont montré de valeurs d'étalement supérieur à celle à base des autres ajouts. Concernant les BAP à base des cendres volante, leurs valeurs d'étalement élevé ont été interprétées par leurs formes sphériques, qui leurs donnent la capacité de disperser l'agglomération des particules du ciment, donc les BAP à base des cendres volantes nécessite un faible dosage de superplastifiant pour avoir une capacité de remplissage constante. En plus, il a été remarqué que puisque la substitution du ciment était par poids et que la densité spécifique des cendres (2,17) est plus faible que le ciment (3,08) et des autres ajouts minéraux (varie de 2,71 à 2,92), le volume du liant augmente causant ainsi une réduction des frottements au niveau de l'interface granulats – pâte. Donc d'après la comparaison entre les valeurs d'étalement des BAP à base de la PZN qui varie de 764 à 687 pour la finesse $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ et celle obtenu par Uysal et Sumer [74], on peut conclure la méthode de formulation de Domone (Annexes B et C) permet la formulation des BAP de bonne capacité de remplissage, puisque elle limite le volume de la pâte en faisant la substitution du ciment

par volume et non pas poids, donc le seul facteur qui influence c'est les caractéristiques de la forme microscopique de l'ajout employé, dans notre cas l'ajout est la PZN. Donc, cela confirme encore les résultats trouvés par Turanli et al. [67], et par conséquent l'effet de perte de capacité de remplissage causé par la PZN dans nos résultats.

Donc comme conclusion des résultats des travaux antérieurs cités ci-dessus, il est clair que les résultats de nos travaux s'accordent avec ces travaux antérieurs, qui en plus ont permis de perfectionner l'interprétation de l'effet de perte d'ouvrabilité causé par l'utilisation de la PZN comme substitution du ciment.

3.3.1.2 Effet de la finesse de la PZN

La figure 3.4 indique que l'augmentation de la finesse de la PZN à 4200 et 5000 cm^2/g réduit légèrement l'étalement du béton par rapport à celui correspondant à la finesse 3500 cm^2/g . Cette réduction est de l'ordre de 8% et 10% pour les finesesses 4200 et 5000 cm^2/g , respectivement. Les valeurs d'étalement correspondantes au taux de substitution de 20% et 25% sont légèrement plus faibles par rapport à la valeur d'étalement admissible minimal [64]. Les valeurs d'étalement pour les deux finesesses élevées (4200 et 5000 cm^2/g) sont comparables. L'augmentation de la surface spécifique de la PZN mise en contact avec l'eau pour les finesesses élevées explique la diminution de l'étalement [73]. Uzal et Turanli [71] ont observé que l'augmentation de la finesse du ciment Portland composé avec 55% de PZN fait accroître légèrement le dosage d'eau d'environ 3%.

D'autres travaux [75], ont permis de conclure que l'influence des ajouts minéraux sur les propriétés des bétons dépend largement de leurs granulométries, finesse ainsi que les caractéristiques de forme et de surface de leurs particules.

Des résultats similaires ont été observés pour les cendres volantes. L'augmentation de la finesse implique un E/L élevé et la diminution des particules poreuses implique un E/L faible dans les cendres volantes. Donc, le résultat net dépend de ce qui est dominant [73].

Felekoglu et al. [73], ont aussi trouvé que l'augmentation de la finesse augmente le dosage d'eau en raison de l'augmentation de la surface des cendres mise en contact avec l'eau.

La variation du temps d'étalement T_{50} en fonction de la finesse et du taux de substitution est donnée dans la figure 3.4. Il a été observé qu'une substitution de 15% du ciment par la PZN donne sensiblement la plus faible valeur T_{50} (3,35 à 5 s) pour les différentes finesses. En plus, on peut constater que l'augmentation de la finesse fait augmenter la valeur de temps d'écoulement. L'augmentation de la finesse de la PZN de 3500 cm^2/g à 5000 cm^2/g augmente le temps T_{50} de 3,35 secondes à 4,90 secondes pour 15% de PZN et de 4,45 secondes à 6,85 secondes pour 25% de PZN. La finesse élevée augmente le temps T_{50} et limite le taux de substitution. On peut aussi ajouter comme remarque, que le temps d'écoulement T_{50} correspondant aux différentes finesses et dosage de la PZN est supérieur à 2 secondes, donc selon les prescriptions européens [2], les BAP formulés sont tous de classe de viscosité VS2.

D'autres travaux ont été déployés sur le Metakolin (MK) qui apparemment a un comportement comparable à celui de la PZN. Parmi ceux ont cite Vějmelkova et al. [76], qui ont trouvé que le BAP à base de Metakolin (MK) présente un faible étalement et un long temps T_{50} par rapport au BAP à base de laitier. Cela est interprété par la finesse élevé du Metakolin (MK) ce qui implique une réactivité plus rapide. Ils ont conclu que le MK nécessite une quantité d'eau ainsi qu'un dosage en SP plus élevé que ceux des BAP à base du laitier afin d'atteindre les paramètres requises pour un BAP conforme.

Melo et Carneiro [77], ont constaté que la consommation de superplastifiant augmente avec l'augmentation du dosage de Metakolin (MK) et sa finesse pour un volume de pâte constante et des valeurs d'étalement visées entre 600 et 650 mm, dont l'influence de la finesse était plus important dans le cas d'un dosage élevé en MK. En plus, il a été remarqué que l'augmentation du volume de pâte fait réduit la consommation du superplastifiant nécessaire pour avoir un étalement qui varie entre 600 et 650 mm. Cela a été interprété par la réduction des frottements intergranulaire, ce qui causera une augmentation de la fluidité du BAP. Par contre, il a été observé que les BAP à faible quantité de pâte ont une très bonne homogénéité en terme de distribution des granulats, et ce pour faible dosage de MK.

D'après les travaux effectués sur l'influence de MK sur la capacité de remplissage des BAP [76,77] ou la consommation de superplastifiant [77], on constate que ces résultats s'accordent avec les résultats de nos travaux, et confirme donc que l'augmentation de la

finesse de l'ajout fait diminuer la capacité de remplissage des BAP. Et la proposition faite par Melo et Carneiro [77] sur l'augmentation du volume de pâte peut être l'une des solutions efficace pour l'amélioration de la capacité des BAP au remplissage.

3.3.2 Étalement S_j et Temps T_{50j} et B_j au J-ring

L'essai J-Ring consiste à analyser la capacité au remplissage, de passage et la résistance à la ségrégation, il permet de mesurer trois paramètres : l'étalement, le temps d'écoulement T_{50j} et le blocage. Pour cela Daczko [78] recommande la comparaison entre un essai d'étalement seul et un essai combiné : cône d'Abram et J-ring. D'après EFNARC [64] La différence entre les étalements obtenus ne doit pas être supérieure à 50 mm.

A. Étalement

Les valeurs d'étalements au J-Ring sont données au tableau 3.5 et illustré sur les figures 3.6 et 3.7.

Tableau 3.5 : Valeurs de l'étalement S_j au J-Ring

PZN%	Finesses (cm^2/g)		
	SSB 3500	SSB 4200	SSB 5000
	Étalement S_j (mm)		
0	684	684	684
10	631	573	552
15	607	556	540
20	597	549	522
25	585	538	504

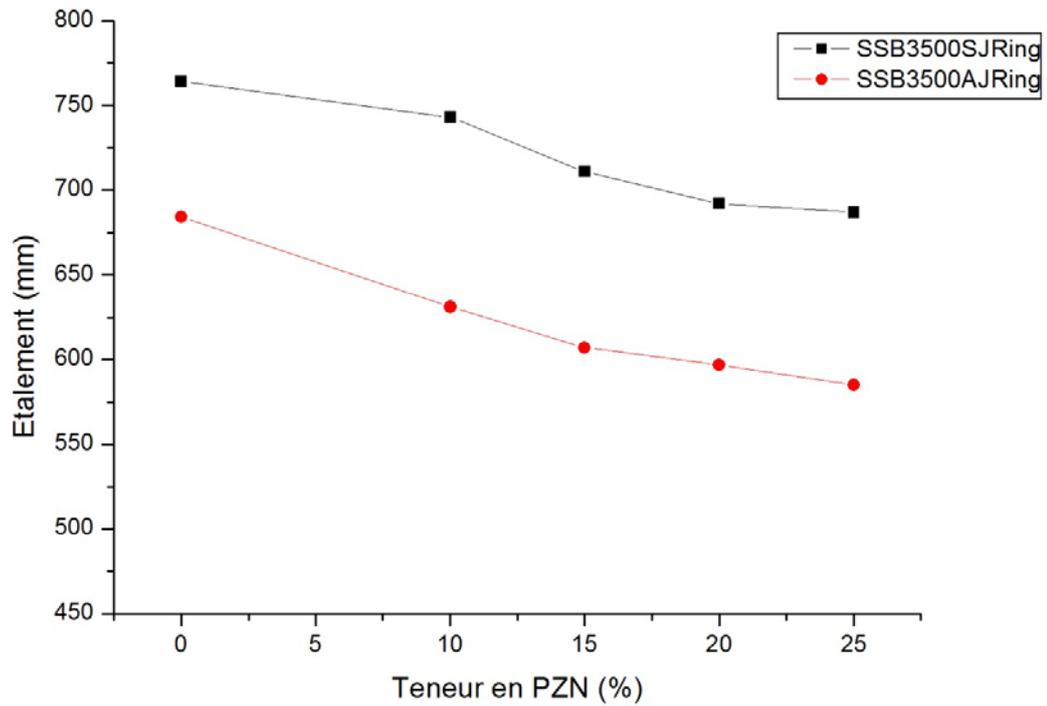


Figure 3.6 : Etalement avec (noté AJRing) et sans J-Ring (noté SJRing) en fonction de la teneur en PZN pour la finesse 3500 cm²/g.

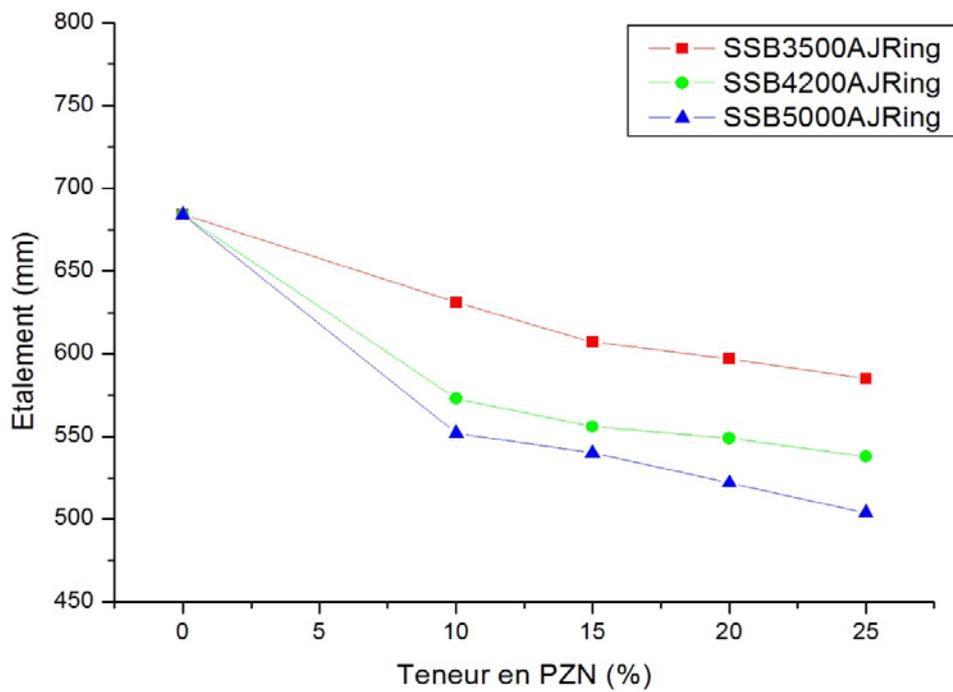


Figure 3.7 : Etalement avec J-Ring en fonction de la teneur en PZN et sa finesse.

D'après la figure 3.6 qui présente la variation d'étalement avec et sans J-Ring pour une finesse constante de 3500 cm²/g, on peut remarquer la nette différence des valeurs d'étalement des mélanges entre l'absence et la présence du J-Ring. Cette différence est interprétée par le blocage au moyen des obstacles créés par le J-Ring dont le taux de réduction de l'étalement est évalué d'une moyenne de 14%. La diminution de l'étalement au J-Ring est plus importante avec l'ajout de la PZN à 10 et 15%, elle est de l'ordre de 8% et 11% respectivement. L'addition de 20 et 25% de PZN ne diminue que légèrement l'étalement au J-Ring par rapport à 10% et 15% de PZN.

La figure 3.7 montre l'effet de l'augmentation de la finesse de la PZN sur la variation d'étalement avec J-Ring par rapport à la finesse 3500 cm²/g de PZN prise comme finesse de référence. On peut constater que l'augmentation de la finesse de la PZN à 4200 cm²/g et 5000 cm²/g diminue sensiblement la valeur d'étalement au J-Ring d'une moyenne de 9% et 13% respectivement, et cela pour les différents taux de substitution (de 10 à 25 %). Ces résultats sont comparables à ceux observés pour l'étalement au cône d'Abrams.

B. Temps d'étalement au J-Ring T_{50j}

Le tableau 3.6 donne les résultats du temps d'écoulement T_{50j} pour les différentes finesses et les différents taux de substitution du ciment par la PZN. L'effet de J-Ring pour la finesse 3500 cm²/g est donné par la figure 3.8. En outre, l'influence de la variation de la finesse est illustrée dans la figure 3.9.

Tableau 3.6 : Valeurs de Temps d'étalement T_{50j} au J-Ring.

PZN%	Finesses (cm ² /g)		
	SSB 3500	SSB 4200	SSB 5000
	T _{50j} (s)		
0	3,46	3,46	3,46
10	4,93	6,67	7,1
15	4,15	6,36	6,94
20	6	7,78	8
25	6,2	8,8	10,4

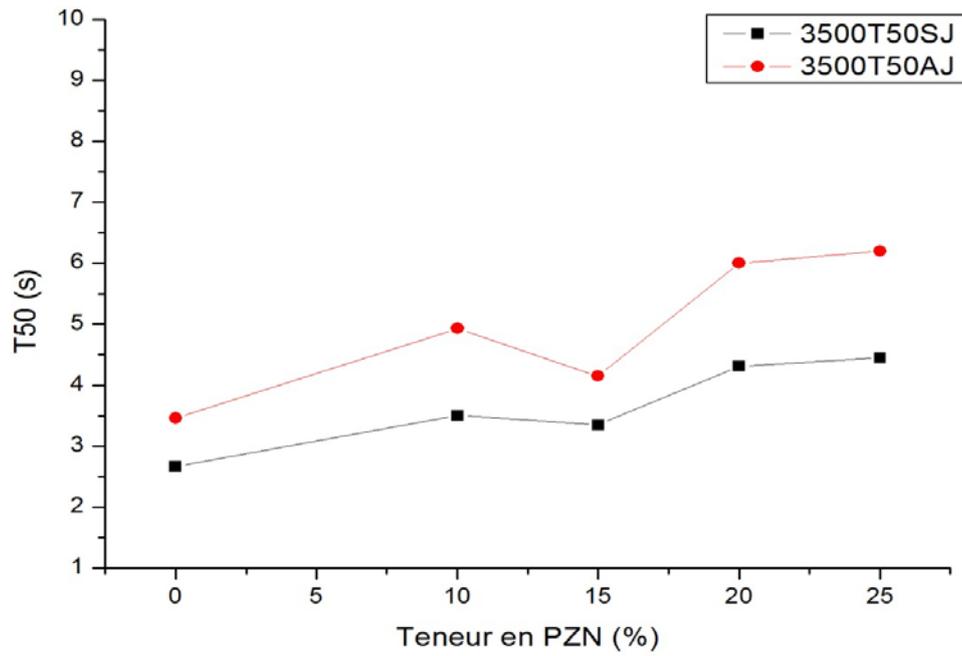


Figure 3.8 : Variation du T_{50} avec (noté AJ) et sans (noté SJ) J-Ring en fonction de la teneur en PZN pour la finesse $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$.

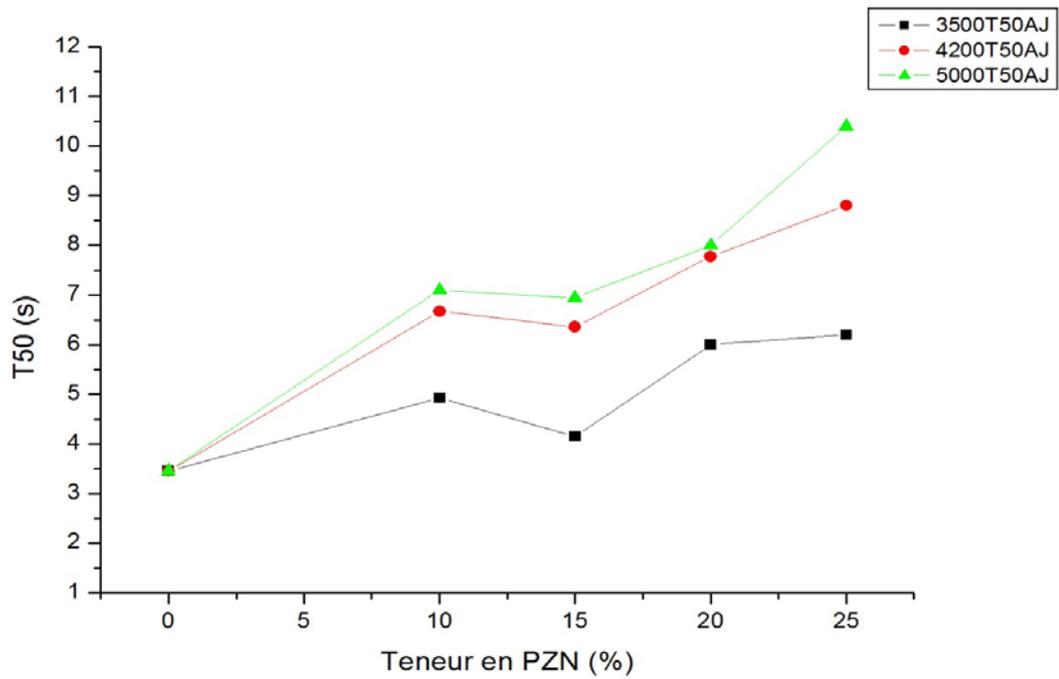


Figure 3.9 : T_{50} avec J-Ring en fonction de la teneur en PZN et sa finesse.

La figure 3.8 montre la variation du temps d'écoulement T_{50} , sans et avec le J-Ring pour la finesse de $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ de la PZN. On remarque que le temps d'écoulement T_{50} en présence du J-Ring accuse un retard considérable par rapport à celui en l'absence du J-Ring. Ce résultat peut être interprété par la présence d'un blocage au moment d'écoulement au niveau du J-Ring. Ce temps est sensiblement minimal dans le cas de la teneur optimale en PZN qui est de 15%.

La figure 3.9 montre l'effet de l'augmentation de la finesse de la PZN sur la variation de la valeur de T_{50j} en fonction de teneur en PZN. On constate que l'augmentation de la finesse augmente la valeur de T_{50j} , dont la valeur correspondante à 15% de PZN augmente de 4,15 secondes pour la finesse de $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ à 6,36 secondes et 6,94 secondes pour les finesses $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$ et $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ respectivement, ce qui correspond à une élévation de 53% et 67% dans l'ordre. Ceci est du probablement à l'effet de l'augmentation de la cohésion causée par l'augmentation de la finesse de la PZN qui influe d'une manière significatif sur le dosage d'eau nécessaire.

C. Différence de hauteur B_j

Le tableau 3.7 et la figure 3.10 présentent les résultats de la différence de hauteurs B_j au cône d'Abrams en présence du J-Ring.

Tableau 3.7 : Valeurs différence de hauteur B_j

PZN%	Finesses (cm^2/g)			B_j admissible (mm)
	SSB 3500	SSB 4200	SSB 5000	
	B_j (mm) au J-Ring			
0	18	18	18	0 - 10
10	20	23	25	0 - 10
15	21	26	28	0 - 10
20	23	27	29	0 - 10
25	24	28	31	0 - 10

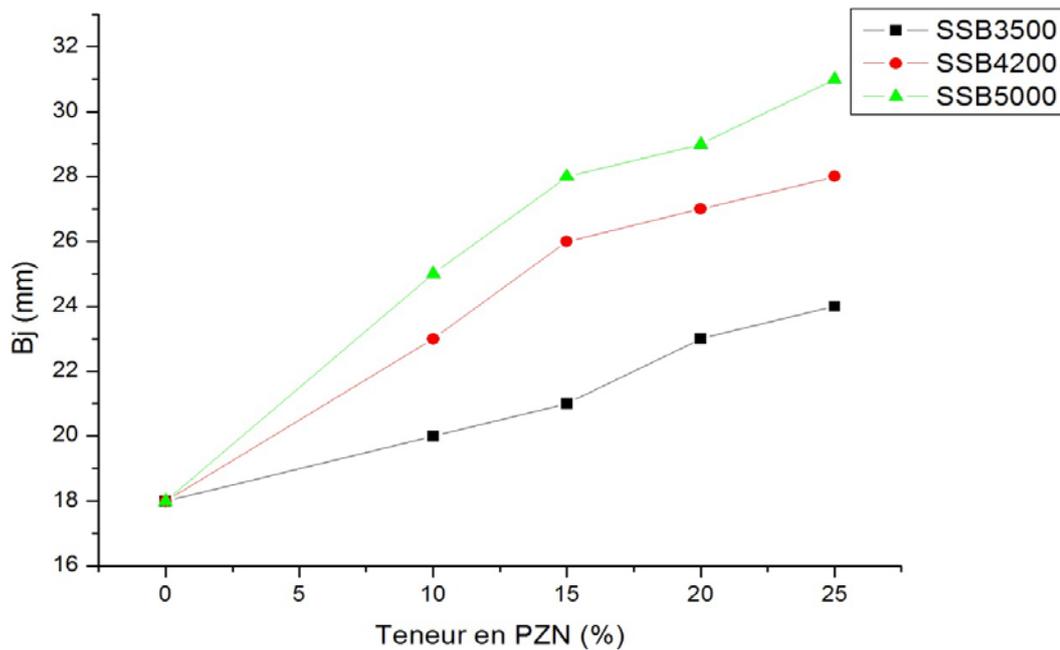


Figure 3.10 : B_j en fonction de la teneur en PZN et sa finesse.

La mesure de la différence de hauteurs qui caractérise la capacité de passage se fait uniquement en présence du J-Ring et on compare les hauteurs des mélanges à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring. La figure indique clairement que cette différence de hauteurs augmente avec l'augmentation de la quantité et la finesse de la PZN dans le mélange. La valeur de B_j de béton de référence (sans ajout) dépasse la valeur max recommandée pour les BAP [64]. La valeur B_j augmente de 18 mm pour le BAP sans ajouts à 24 mm, 28 mm et 31 mm pour un BAP avec 25% de PZN pour les finesses de 3500, 4200 et 5000 cm^2/g respectivement. Ce comportement est dû à l'augmentation de la viscosité en raison de l'augmentation de la teneur en PZN et sa finesse agissant d'une manière significative sur la demande en eau.

A titre de comparaison avec d'autres ajouts. Liu [57], a étudié l'influence des cendres volantes (CV) à différents taux de substitution (0, 20, 40, 60, 80 et 100%) sur le comportement rhéologique du BAP. Il a remarqué que la différence de hauteur B_j au J-Ring, augmente de 11 mm (0% de cendre) à 22 mm (100% de cendre). Selon l'auteur, si la différence ne vient pas de la variation de la méthode d'essai, elle doit résulter de la différence entre deux formulations c.à.d BAP à 0% et 100% de cendre. Il a été observé que la formulation à base de 100% de cendres a un rapport E/L élevé et un faible dosage de

SP que la formulation à base de 0% de cendres. De ce fait, il a été conclu que l'influence combinée de l'augmentation de la teneur en cendres et du rapport E/L suivi par la diminution du dosage de SP mène à une augmentation de la viscosité et par conséquent à une augmentation de la valeur de B_j pour un dosage en gros granulat constant.

3.3.3 Temps d'écoulement au V-Funnel

L'essai consiste à évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées grâce à la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir (en seconde). Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction de la finesse et du pourcentage de la PZN sont indiqués sur le tableau 3.8, et la figure 3.11. Cet essai indique la capacité de remplissage du mélange.

Tableau 3.8 : Valeurs de temps d'écoulement au V-Funnel ($T_{V-Funnel}$)

PZN%	Finesses (cm^2/g)			$T_{V-Funnel}$ admissible (s)
	SSB 3500	SSB 4200	SSB 5000	
	$T_{V-Funnel}$ (s)			
0	9,70	9,70	9,70	6 - 12
10	14,00	17,02	19,25	6 - 12
15	12,80	15,93	20,07	6 - 12
20	14,70	20,20	23,71	6 - 12
25	18,50	27,13	31,00	6 - 12

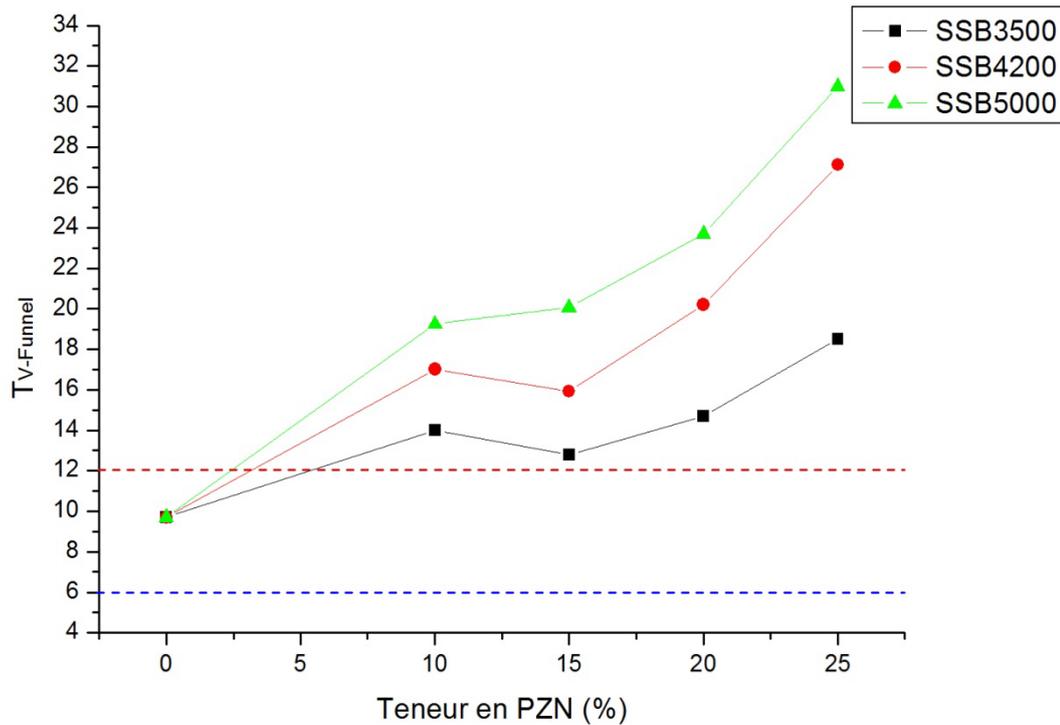


Figure 3.11 : $T_{V-Funnel}$ en fonction de la teneur en PZN et sa finesse.

On peut remarquer que la valeur du temps $T_{V-Funnel}$ augmente légèrement avec l'augmentation de dosage de la PZN pour le cas de la finesse 3500 cm^2/g . Les valeurs dépassent légèrement la limite supérieure recommandée pour les BAP, c-à-d 12 s [64]. L'optimum est obtenu à 15% de PZN dont la valeur du $T_{V-Funnel}$ est de 12,8 s. En plus, on peut constater que les valeurs de temps d'écoulement correspondantes à la finesse 3500 cm^2/g varient entre 9,7 s et 18,5 s donc selon les recommandations européennes [2], les BAP correspondant peut être classés sous la classe VS2 qui traduit une bonne résistance à la ségrégation.

Uysal et Sumer [74], ont analysé le temps d'écoulement au V-Funnel des BAP à base de différents ajouts minéraux (le calcaire, la cendre volante, le laitier, la poudre de basalte et la poudre de marbre). Ils ont trouvés que toutes les formulations n'ont pas vérifiées la limite admissible de T_{V-F} . Par conséquent, un T_{V-F} supérieur à 15 s serait très cohésif et difficile à manipulé.

Diamantonis et al. [72], ont trouvé que la substitution du ciment portland par la PZN (20% et 40%) augmente légèrement la valeur de la viscosité plastique des BAP. Bethmont [66], a remarqué que la majorité des auteurs s'accordent sur le fait que la viscosité est bien corrélée au temps d'écoulement mesuré au V-Funnel et éventuellement au T_{50} . Par conséquent, on peut conclure que la substitution du ciment par la PZN augmente légèrement la valeur du temps d'écoulement au V-Funnel.

Gesoğlu et al. [39], ont constaté que le temps d'écoulement T_{V-F} dépend principalement de type d'ajout employé. La procédure de leur travail consistait à confectionner des BAP avec un liant binaire, ternaire et quaternaire de trois différents ajouts (cendre volante, laitier et fumé de silice), dont l'étalement visé est de 730 ± 30 mm, avec un dosage en poudre (450 kg/m^3) et en eau fixe ($E/L = 0,44$). Donc, il a été remarqué que le T_{V-F} varie de 3,2 s à 14s. Dont la plus faible valeur (3,2 s) corresponde au BAP de référence (sans ajout), par contre la plus grande valeur (14 s) corresponde à un BAP à base de laitier sous forme d'un liant binaire (60% ciment + 40% laitier). Selon l'auteur, l'incorporation de la fumée de silice ou le laitier comme substituant du ciment en tant que liant binaire augmente généralement la viscosité du béton. Cependant l'emploi des cendres volantes à un taux de substitution supérieur à 20% fait diminuer la viscosité ce qui implique un temps d'écoulement T_{V-F} plus faible. Donc la solution proposée par l'auteur dans le but de diminuer la valeur de T_{V-F} est d'utiliser les ajouts minéraux comme substituant de ciment sous forme d'un liant ternaire ou quaternaire afin de bénéficier des avantages de chaque'un. Donc ces propositions peuvent être considérées comme l'une des solutions économique et efficace pour diminuer les valeurs du temps d'écoulement T_{V-F} correspondante à la substitution du ciment par la PZN dans nos résultats.

Le temps d'écoulement augmente sensiblement en fonction de l'augmentation de finesse de la PZN. Le temps T_{V-F} augmente de 18,50 secondes à 31,00 secondes lorsque la finesse augmente de $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ à $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ pour un taux de substitution en PZN de 25%. Ce comportement est dû à l'augmentation de la cohésion du mélange résultante de l'augmentation de la finesse, ce qui rend la capacité du passage à travers l'orifice du V-Funnel plus difficile, puisque l'augmentation de la cohésion provoque le blocage du mélange au niveau bas du V-Funnel. D'après Barbhuiya [79], un temps d'écoulement T_{V-F} élevé signifié une viscosité élevée.

3.3.4 Résultats de L-Box

L'essai de la boîte en L (L-Box) donne une bonne appréciation de la capacité de remplissage, de passage et de la résistance à la ségrégation.

A. Rapport H_2/H_1

Les résultats du rapport H_2/H_1 sont donnés dans le tableau 3.9, et la figure 3.12.

Tableau 3.9 : Valeurs du rapport H_2/H_1 de l'essai de L-Box

PZN%	Finesses (cm^2/g)			H_2/H_1 Admissible
	SSB 3500	SSB 4200	SSB 5000	
	H_2/H_1			
0	0,63	0,63	0,63	0,80 – 1,00
10	0,62	0,59	0,55	0,80 – 1,00
15	0,6	0,53	0,5	0,80 – 1,00
20	0,57	0,47	0,42	0,80 – 1,00
25	0,49	0,43	0,39	0,80 – 1,00

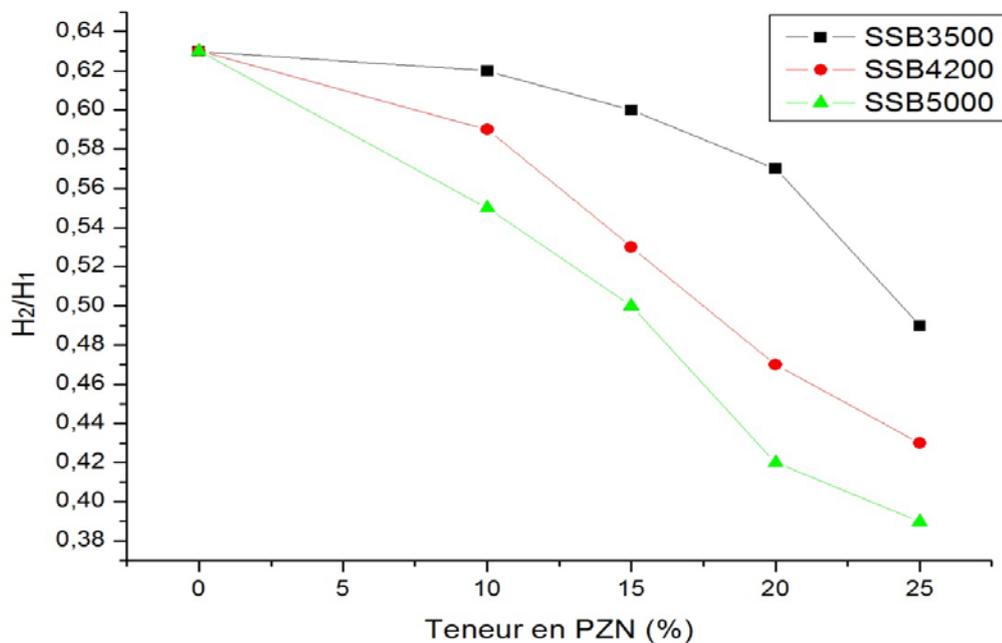


Figure 3.12 : Rapport H_2/H_1 en fonction de la teneur en PZN et sa finesse.

On remarque que le rapport H_2/H_1 est de 0,63 pour les BAP sans ajouts selon les exigences de l'essai un taux de remplissage inférieur à 80% veut dire un risque de blocage. Pour une finesse constante de 3500 cm^2/g , on remarque que plus le pourcentage de la PZN augmente plus le rapport H_2/H_1 diminue. L'augmentation du taux de substitution de 10% à 25% réduit le rapport H_2/H_1 de 0,62 à 0,49.

Sonebi et al. [80] ont démontré que le rapport H_2/H_1 est influencé par trois paramètres, le dosage en eau, le dosage en superplastifiant et la quantité de gros granulats dans le mélange. L'augmentation des deux premiers paramètres mène vers l'augmentation du rapport H_2/H_1 mais l'augmentation du dosage en granulats mène vers une diminution du rapport H_2/H_1 et augmente le risque de blocage des gros granulats derrière les bars d'aciers du L-Box.

Borsoi et al. [81] ont trouvé que la mobilité du BAP avec du laitier ou un mélange laitier-cendres volantes est beaucoup plus élevée que celle du BAP avec les cendres volantes uniquement. Ce dernier apparaît être très cohésif et donc plus lent que les autres mélanges.

En plus, l'augmentation de la finesse de 3500 cm^2/g à 4200 cm^2/g et 5000 cm^2/g diminue le rapport H_2/H_1 , cette dernière varie de 0,59 à 0,43 pour la finesse 4200 cm^2/g et de 0,55 à 0,39 pour un dosage en PZN qui varie de 10% à 25% pour la finesse 5000 cm^2/g . Ce résultat peut être interprété par l'augmentation de la cohésion de mélange d'une manière significative qui mène à un blocage au moyen des barres de ferrailage. Cette augmentation de cohésion est due à l'effet de la PZN ainsi que l'augmentation de sa finesse sur l'augmentation de besoin d'eau. Selon EFNARC [64], l'essai au L-Box est plus sensible au blocage.

B. Temps d'écoulements T_{20} et T_{40}

Les temps T_{20} et T_{40} désignent le temps de passage du béton à la ligne des 20 cm et à celle des 40 cm respectivement. Ils permettent d'évaluer la vitesse d'écoulement et donnent ainsi une indication pour la capacité de remplissage. Les valeurs de T_{20} et T_{40} sont données aux tableaux 3.10 et 3.11 et leurs variations en fonction de la teneur en PZN et sa finesse sont montrés par les figures 3.13 et 3.14.

Tableau 3.10 : Valeurs de temps d'écoulement T_{20} de l'essai de L-Box.

PZN%	Finesses (cm^2/g)			T_{20} admissible (s)
	SSB 3500	SSB 4200	SSB 5000	
	T_{20} (s)			
0	2,91	2,91	2,91	$\leq 1,50$
10	1,88	2,51	2,74	$\leq 1,50$
15	1,42	1,76	2,11	$\leq 1,50$
20	1,53	1,86	2,05	$\leq 1,50$
25	1,67	2,13	2,22	$\leq 1,50$

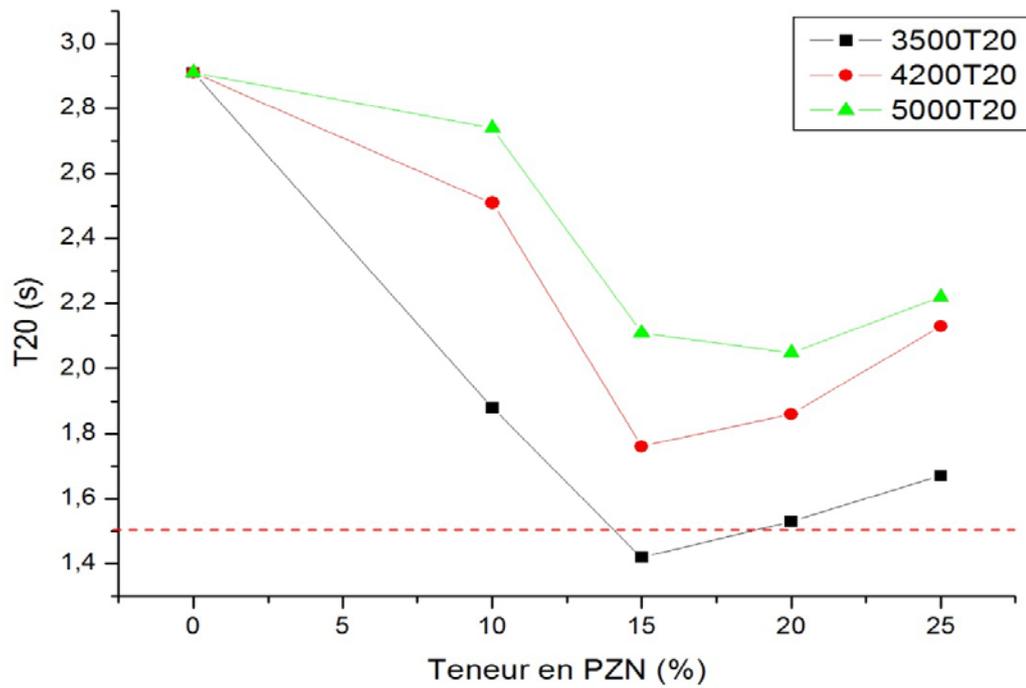


Figure 3.13 : T_{20} en fonction de la teneur en PZN et sa finesse.

Tableau 3.11 : Valeurs de temps d'écoulement T_{40} de l'essai de L-Box

PZN%	Finesses (cm^2/g)			T_{40} admissible (s)
	SSB 3500	SSB 4200	SSB 5000	
	T_{40} (s)			
0	7,10	7,10	7,10	$\leq 3,5$
10	3,39	4,6	5,24	$\leq 3,5$
15	2,12	3,65	4,76	$\leq 3,5$
20	2,53	3,93	5,00	$\leq 3,5$
25	3,10	4,16	5,13	$\leq 3,5$

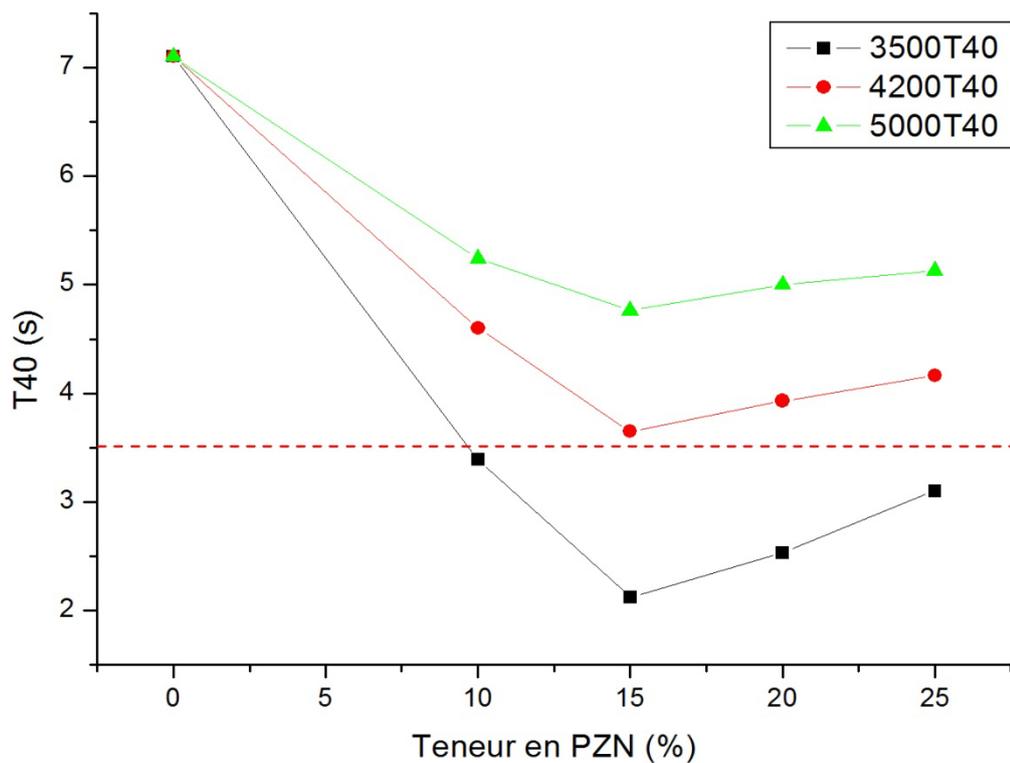


Figure 3.14 : T_{40} en fonction de la teneur en PZN et sa finesse.

On note que la valeur des deux temps d'écoulement diminue et ce jusqu'à un taux de PZN de 15% ensuite elle augmente légèrement pour des teneurs en PZN supérieur à 15% (Fig.3.13 et Fig. 3.14) Cette tendance est observée pour toutes les finesses de la pouzzolane étudiées.

Par conséquent, on peut conclure qu'un taux de substitution de 15% de ciment par la PZN présente un dosage optimal. L'augmentation de la finesse augmente considérablement la valeur des temps d'écoulement T_{20} et T_{40} . Ce résultat peut être expliqué par l'augmentation de la viscosité (cohésion) du mélange résultant de l'augmentation de la finesse qui fait augmenter la demande en eau.

3.3.5 Résistance à la Ségrégation par Tamisage

Le tableau 3.12 et la figure 3.15 montrent les résultats des pourcentages de laitance passant à travers un tamis de 5 mm pour déterminer le degré de ségrégation statique des mélanges en fonction de la teneur en PZN.

Tableau 3.12 : Valeurs de la laitance des mélanges en %

PZN%	Finesses (cm ² /g)			Laitance II admissible (%)
	SSB 3500	SSB 4200	SSB 5000	
	Pourcentage de Laitance II (%)			
0	4,52	4,52	4,52	0 - 15
10	4,11	4,05	3,95	0 - 15
15	3,89	3,71	3,54	0 - 15
20	3,63	3,54	3,34	0 - 15
25	3,48	2,89	2,20	0 - 15

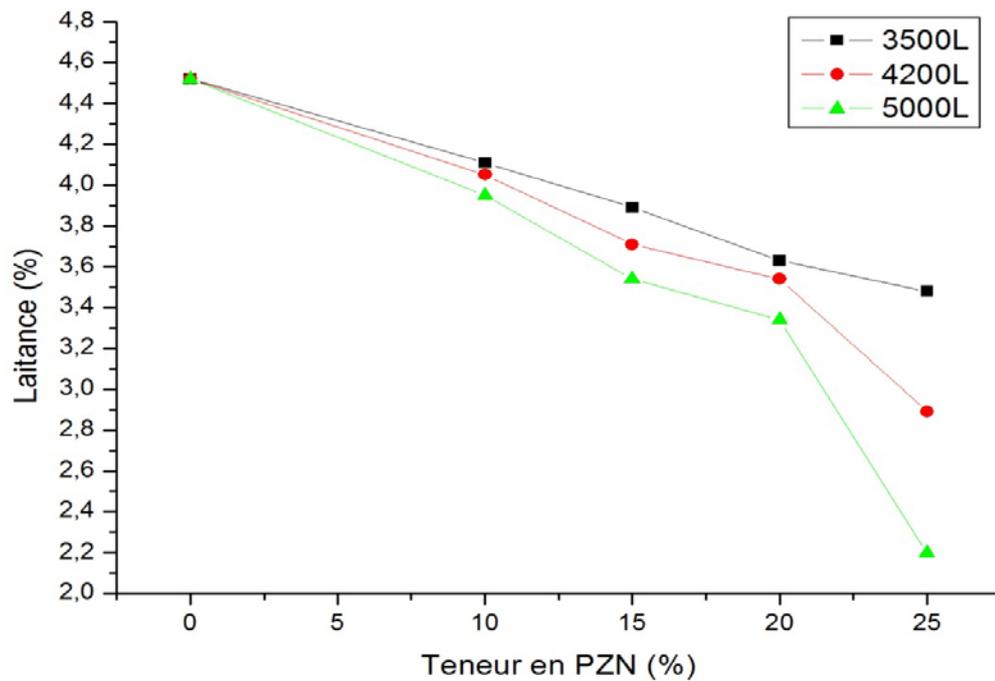


Figure 3.15 : Laitance en fonction de la teneur en PZN et sa finesse.

Selon la figure 3.15, on peut observer que le pourcentage de la laitance diminue en fonction de l'augmentation de la teneur de la PZN. L'ajout de pouzzolane naturelle augmente la viscosité des mélanges et provoque une baisse de la ségrégation statique. Les valeurs de pourcentage de laitance trouvées présentent une stabilité satisfaisante selon les recommandations de l'EFNARC [64] qui exige un pourcentage de laitance inférieur à 15% pour une stabilité satisfaisante.

Liu [57], a constaté qu'il y'a une amélioration de la résistance des BAP à la ségrégation pour les formulations à base de 80% et 100% de cendres volantes (CV). L'indice de ségrégation de ces deux formulations a été seulement de 5% et 7% respectivement. Ceci est conforme avec les travaux de Bouzoubaa et Lachemi [40] qui ont constaté que l'indice de ségrégation des BAP à base de cendres volantes diminue avec l'augmentation du dosage de cendres qui est accompagné par une augmentation du dosage du SP et une diminution du rapport E/L. D'autres travaux [82] ont montré que la résistance à la ségrégation est liée à la capacité de passage et à la viscosité du BAP. Donc selon l'auteur, les BAP à un taux de substitution de ciment par les cendres volantes jusqu'à un 80% et 100% ont une viscosité plus élevée que ceux à un taux de substitution inférieur, cela peut entraîner une baisse de ségrégation.

3.3.6 Résultats d'U-Box

Le principe est sensiblement le même que pour la boîte en L. Il est utilisé au Japon et en Angleterre. Le béton doit s'écouler à travers des armatures et remonter dans la deuxième partie du U de la boîte. Une hauteur de remplissage supérieure à 300 mm est requise [7].

Le tableau 3.12 donne les valeurs de la hauteur de remplissage en fonction de la teneur en PZN et sa finesse. Ces valeurs sont représentées par la figure 3.16.

Tableau 3.13 : Valeurs de la Hauteur de remplissage à la boîte en U

PZN%	Finesses (cm ² /g)			H _{Remplissage} admissible (mm)
	SSB 3500	SSB 4200	SSB 5000	
	H _{Remplissage} (mm)			
0	277	277	277	270 - 300
10	274	257	234	270 - 300
15	271	239	223	270 - 300
20	259	221	217	270 - 300
25	244	213	208	270 - 300

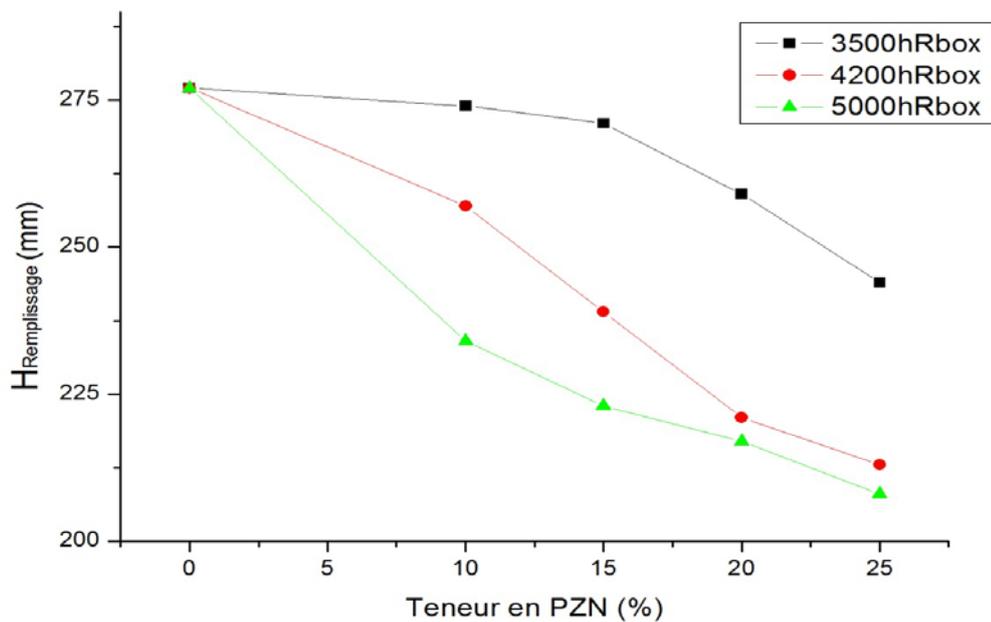


Figure 3.16 : H_{Remplissage} au en fonction de la teneur en PZN et sa finesse.

On constate que la hauteur de remplissage dans le deuxième compartiment d'U-Box diminue en fonction de l'augmentation de la teneur et la finesse de la PZN. Le comportement donc est semblable à celui observé dans le L-Box. Pour la finesse 3500 cm²/g on constate une diminution de la hauteur de remplissage de 277 mm à 244 mm, dont seulement celle correspondantes à dosage de la PZN de 10% et 15% ont vérifiées les limite proposées par EFNARC [64]. En plus il a été constaté que l'augmentation de la finesse de la PZN de 3500 cm²/g à 4200 cm²/g et 5000 cm²/g fait diminuer la hauteur de remplissage, cette dernière varie de 257 mm à 213 mm pour la finesse 4200 cm²/g et de 234 mm à 208 mm pour la finesse 5000 cm²/g, et ce pour un taux de substitution variable de 10% à 25%. Ce résultat peut être interprété par l'augmentation de la viscosité de mélange d'une manière significative qui mène à un blocage au moyen des barres de ferrailage.

3.4 Conclusion

La substitution partielle du ciment par la PZN de Béni-Saf a modifié certains paramètres rhéologiques du BAP de référence (sans ajout) formulé par la méthode de Domone.

Concernant le temps et le diamètre d'étalement, l'introduction de la PZN et la variation de sa finesse n'a pas un effet significatif. Toutes les valeurs ont été incluses dans les limites des valeurs proposées par les recommandations européennes. En plus, il est constaté que le taux de substitution optimal qui donne un temps d'étalement le plus faible est de 15%. En plus le BAP à base de PZN présente une très bonne résistance à la ségrégation statique comme il été démontré par l'essai au tamis de 5 mm.

Le problème noté pour les BAP à base de PZN est leur capacité de passage, qui est faible par rapport au BAP sans ajout. L'augmentation du dosage de la PZN ainsi que sa finesse ont augmenté la cohésion du mélange. Donc, afin de contourner ce problème il est nécessaire d'augmenter le rapport E/L ou SP/L.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

L'objectif de ce travail était d'analyser l'effet de l'addition de la pouzzolane naturelle sur les caractéristiques rhéologique du BAP. Afin de pouvoir l'établir, deux paramètres ont été variés par rapport à la composition du BAP de référence (sans ajouts minérale), le taux de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle (à raison de 10, 15, 20 et 25%) et la variation de sa finesse (SSB : 3500, 4200 et 5000 cm^2/g).

Les résultats de l'étude expérimentale ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le pourcentage optimal Sp/L à utiliser dans les mélanges de béton est de 1.8% selon la méthode de formulation dont le superplastifiant utilisé est de type Polycarboxylate.
- Concernant la mobilité au milieu non confiné qui est décrit par l'essai d'étalement, la PZN a peu d'influence, mais a tendance à réduire l'ouvrabilité du béton, ce qui induit une réduction du diamètre de la galette du béton. Ceci a été expliqué par l'effet absorbant de la PZN sur l'eau de gâchage. En plus un temps d'écoulement T_{50} plus faible a été observé pour un taux de substitution du ciment par la PZN de 15%.
- L'augmentation de la finesse cause une légère perte d'ouvrabilité d'après les résultats d'essai d'étalement au cône.
- La viscosité plastique est proportionnelle aux temps d'écoulement T_{50} au cône d'Abrams et T_{V-F} de l'entonnoir en V (V-Funnel). Pour le T_{50} et le T_{V-F} le taux de substitution de 15% du ciment par la PZN correspond au dosage optimal.
- L'utilisation de la PZN dans la formulation des BAP améliore leur stabilité vis-à-vis à la ségrégation statique.
- L'augmentation de dosage de la PZN ainsi que sa finesse ont un effet similaire sur la viscosité du mélange (augmentation).
- l'introduction de la PZN dans la formulation du BAP peut avoir un effet négatif sur la capacité du passage à travers les milieux confiné. Dans le cas de notre étude les résultats des essais de contrôle de la mobilité en milieu confiné n'ont pas satisfait les recommandations européennes.

Les travaux dans le cadre de ce mémoire ont été limité à l'étude de l'effet de la PZN sur les propriétés rhéologiques du BAP et d'autres aspects restent à élucider. Par conséquent, nous recommandons, pour les futurs travaux, ce qui suit :

- Formulation des BAP à base de liants ternaires (ciment + deux différents ajouts) dans le but d'avoir un BAP qui vérifie les recommandations exigées.
- Etudier la consommation du superplastifiant ou de l'eau pour un dosage de PZN fixe.
- Etudier les caractéristiques mécaniques et la durabilité du BAP à base de PZN en ciment ternaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **OKAMURA H., OUCHI M.**, 'Self-compacting concrete', Journal of advanced Concrete Technology, vol. 1, N°1, 2003, pp. 5-15.
- [2] **BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC**, 'The European Guidelines for Self-Compacting Concrete', May 2005.
- [3] **HEIRMAN G., VANDEWALLE L., GEMERT D. V., BOEL V., AUDENAERT K., SCHUTTER G. D., DESMET B., VANTOMME J.**, 'Time-dependent deformations of limestone powder type self-compacting concrete', Engineering Structures, Vol. 30, N° 10, 2008, pp.2945–2956.
- [4] **NEVILLE A. M.**, 'Propriétés des bétons', Edition Eyrolle, septembre 2000, 824 pages.
- [5] **ASSIE S.**, 'Durabilité des bétons autoplaçants', Thèse de Doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse, 2004, 254 pages.
- [6] **DOMONE P.L.**, 'Self-compacting concrete : An analysis of 11 years of case studies', Cement & Concrete Composites, Vol. 28, 2006, pp.197–208.
- [7] **JIN J.**, 'Properties of mortar for self-compacting concrete', Thèse de Doctorat, Université de Londres, 2002, 398 pages.
- [8] **NF EN 934-2**, 'Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour bétons. Définitions et exigences ', AFNOR, avril 1998.
- [9] **BENSEBTI S. E.**, 'Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux', Thèse de Doctorat, U. M. Constantine, Algérie, 2008.

- [10] **AITCIN P., JIANG S., KIM B. G., PETROV N.**, 'L'interaction ciment / superplastifiant. Cas des polysulfonates', Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, Juillet-Août 2001, N° 233, pp. 87-98.
- [11] **SHINDOH T., MATSUOKA Y.**, 'Development of combination type self compacting concrete and evaluation test method', Journal of advanced concrete technology, Vol.1, N° 1, 2003, pp. 26-36.
- [12] **KHELIFA M. R.**, 'Effet de l'attaque sulfate externe sur la durabilité des BAP', Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2009, 178 pages.
- [13] **WÜSTHOLZ T.**, 'A Model Approach To Describe The Fresh Properties Of Self-compacting Concrete', Otto-Graf-Journal, Vol. 16, 2005, pp. 79-94.
- [14] **ABDELBAKI B., RABIA K., MADJID S., MOHAMMED S.**, 'Comportement rhéologique des pâtes cimentaires destinées aux bétons autoplaçants', Revue Nature et Technologie, Université de Boumerdès, Algérie, N° 01, 2009, pp. 74-88.
- [15] **LARRARD F. D.**, 'Structure granulaires et formulation des bétons', Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA 34, avril 2000, 414 pages.
- [16] **TATTERSALL G.H., BANFILL P.F.G.**, 'Rheology of Fresh Concrete', Pitman, 1983, London.
- [17] **ASSOCIATION FRANÇAISE DE GENIE CIVIL (AFGC)**, 'Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants', Janvier 2008, 64 pages.
- [18] **OKAMURA H., OZAWA K.**, 'Mix-design for self-compacting concrete', Concrete Library of JSCE, 1995, Vol. 25, pp. 107-120.

- [19] **SEDRAN T.**, 'Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Des Ponts et Chaussées, 1999, 224 pages.
- [20] **TURCRY P.**, 'Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants Influence de la Formulation', Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes, 2004, 230 pages.
- [21] **KHAYAT K.H., GHEZAL A., HADRICHE M.S.**, 'Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete', In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, RILEM, 1999, pp. 345-359.
- [22] **IREX**, 'La méthode MBE', Projet national calibe', Institut pour la Recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil, Paris, France, 2011, 34 pages, Cite web : WWW.IREX.ASSO.FR.
- [23] **FELEKOGLU B.**, 'Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry', Conservation and Recycling, Vol. 51, N° 4, October 2007, pp. 770-791.
- [24] **ZHU W., GIBBS J. C.**, 'Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete', Cement Concrete Research, Vol. 35, N° 8, 2005, pp. 1457-1462.
- [25] **PETERSSON Ö.**, 'Limestone powder as filler in self-compacting concrete – Frost resistance and compressive strength', Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, 2001, pp. 277-284.
- [26] **GIBBS J.C., ZHU W.**, 'Strength of hardened self-compacting concrete', Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, 13-15 septembre 1999, pp. 199-209.

- [27] **DOMONE P.L.**, 'A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete', *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, N° 1, 2007, pp. 1-12.
- [28] **FELEKOĞLU B., TÜRKEL S., BARADAN B.**, 'Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete', *Building and Environment*, Vol. 42, N° 4, 2007, pp. 1795-1802.
- [29] **MŇAHONČÁKOVÁ E., PAVLÍKOVÁ M., GRZESZCZYK S., KOVÁ P. R., ČERNÝ R.**, 'Hydric, thermal and mechanical properties of self-compacting concrete containing different fillers', *Construction and Building Materials*, Vol. 22, N° 7, 2008, pp. 1594-1600.
- [30] **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, N° 4, 2008, pp. 456-462.
- [31] **ŞAHMARAN M., YAMAN İ. Ö., TOKYAY M.**, 'Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash', *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, N° 2, 2009, pp. 99-106.
- [32] **TURCRY P., ROZIERE E., LOUKILI A.**, 'Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait de fissuration des bétons autoplaçants', XXII^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie-Civil, Grenoble, 2005.
- [33] **KRACHAÏ R.M., BOUABDALLAH M. A., ABDELHADI H., HAMOU K.** 'Influence de la pouzzolane de beni-saf sur les performances mécaniques des bétons autoplaçants', 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, Oran, Algérie, 2009, pp. 287-294.

- [34] **TOPCU I. B., UYGUNOGLU T.**, 'Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC) (2009)', *Construction and Building Materials*, Vol. 24, N° 7, July 2010, pp. 1286-1295.
- [35] **PARRA C., VALCUENDE M., GÓMEZ F.**, 'Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 25, N° 1, 2011, pp. 201-207.
- [36] **FARES H.**, 'Propriétés mécaniques et physico-chimiques des BAP exposés à une température élevée', Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2009, 206 pages.
- [37] **ABDELHAFID C.**, 'Comportement Diffère Des Variétés De Bétons', Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2008, 252 pages.
- [38] **YAMMINE J.**, 'Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques ', Thèse de Doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, 2007, 262 pages.
- [39] **GESOĞLU M., GÜNEYISI E., ÖZBAY E.**, 'Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume', *Construction and Building Materials*, Vol. 23, N° 5, 2009, pp. 1847-1854.
- [40] **BOUZOUBAÂ N., LACHEMI M.**, 'Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash Preliminary results', *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, N° 3, 2001, pp. 413-420.
- [41] **ŞAHMARAN M., YAMAN İ. Ö., TOKYAY M.**, 'Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash', *Cement & Concrete Composites*, Vol. 31, N° 2, 2009, pp. 99-106.

- [42] **KHATIB J.M.**, 'Performance of self-compacting concrete containing fly ash', *Construction and Building Materials*, Vol. 22, N° 9, September 2008, pp. 1963-1971.
- [43] **GÜNEYISI E., GESOĞLU M., ÖZBAY E.**, 'Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures', *Construction and Building Materials*, Vol. 24, N° 10, 2010, pp. 1878-1887.
- [44] **KHADRAOUI F.**, 'Incidence Du Renforcement A L'aide De Plaques En Matériau Composite Sur Le Comportement Différé Du Mortier', Thèse De Doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées De Rouen, 2009, 113 pages.
- [45] **BARON J., OLLIVIER J. P.**, 'La Durabilité Des Bétons', Livre, Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, Collection de l'Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, 1992, 453 pages.
- [46] **ROZIÈRE E., GRANGER S., TURCRY PH., LOUKILI A.**, 'Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete', *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, N° 8, September 2007, pp. 626-636.
- [47] **FAVRE R., JACCOUD J. P., BURDET O., CHARIF H.**, 'Dimensionnement des structures en béton', Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 3ème édition, vol. 8, 2004, 612 pages.
- [48] **ZREIKI J.**, 'Comportement du béton au jeune âge dans les structures massives. Application au cas de réparation des ouvrages', Thèse de Doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, 2009, 265 pages.

- [49] **PONS G., PROUST E., ASSIE 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 (PRO 33), Reykjavik, Iceland, 17-20 Août 2003, pp. 645-645.
- [50] **PERSSON B.**, 'A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete', Cement and Concrete Research, Vol. 31, N° 2, 2001, pp. 193-198.
- [51] **TRÄGÅRDH J.**, 'Microstructural features and related properties of self-compacting concrete', Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, septembre 1999, pp. 175-186.
- [52] **ZHU W., BARTOS P. J. M.**, 'Permeation properties of self-compacting concrete', Cement and Concrete Research, Vol. 33, N° 6, 2003, pp. 921-926.
- [53] **ASSIÉ S., ESCADEILLAS G., WALLER V.**, 'Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability', Construction and Building Materials, Vol. 21, N° 10, 2007, pp. 1909-1917.
- [54] **DEBY M. F.**, 'Approche probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin', Thèse de Doctorat, Université De Toulouse, 2008, 202 pages.
- [55] **NEHDI M., PARDHAN M., KOSHOWSKI S.**, 'Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements', Cement and Concrete Research, Vol. 34, N° 11, 2004, pp. 2103-2112.
- [56] **DINAKAR P., BABU K.G., SANTHANAM M.**, 'Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes', Cement and Concrete Composites, Vol. 30, N° 10, 2008, pp. 880-886.

- [57] **LIU M.**, 'Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash', *Construction and Building Materials*, Vol. 24, N° 7, 2010, pp. 1245-1252.
- [58] **VALCUENDE M., PARRA C.**, 'Natural carbonation of self-compacting concretes', *Construction and Building Materials*, Vol. 24, N° 5, 2010, pp. 848-853.
- [59] **VEJMELKOVÁ E., KEPPERT M., GRZESZCZYK S., SKALIŃSKI B., ČERNÝ R.**, 'Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag', *Construction and Building Materials*, Vol. 25, N° 3, 2011, pp. 1325-1331.
- [60] **HOCINE S.**, 'Influence du type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplçants', Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 2010, 261 pages.
- [61] **BOUKENDAKDJI O.**, 'Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplçant : optimisation des conditions opératoires', Thèse de Doctorat, Université Blida, Algérie, 2010, 199 pages.
- [62] **DOMONE P.L.J. AND JIN J.**, 'Properties of mortar for Self-Compacting Concrete', *Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, RILEM Proceedings PRO 7, Paris, 1999, pp. 109-120.
- [63] **CUSSIGH F.**, 'Bétons auto-plçant (BAP)', *Technique d'ingénieur*, Réf. C2217, 2007, pp. 1-8.
- [64] **EFNARC**, 'Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete', ISBN 0 9539733 4 4, 2002, 32 pages.
- [65] **SCHUTTER G D.**, 'Guidelines for testing fresh self-compacting concrete', European Research Project, September 2005, 24 pages.

- [66] **BETHMONT S.**, 'Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005, 159 pages.
- [67] **POURKHORSHIDI A.R., NAJIMI M., PARHIZKAR T., JAFARPOUR F., HILLEMEIER B.**, 'Applicability of the standard specifications of ASTM C618 for evaluation of natural pozzolans', *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, N° 10, November 2010, pp. 794-800.
- [68] **KAID N., CYR M, KHELAFI H., GOUFI N.**, 'Caractéristiques mécaniques de bétons contenant une pouzzolane naturelle face aux attaques a l'eau de mer et aux sulfates', SBEIDCO - 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), October 2009, pp. 43-50.
- [69] **İBRAHIM T., ABDULHAMIT K.**, 'Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete', *Building and Environment*, Vol. 42, N° 6, 2007, pp. 2378-2383.
- [70] **TURANLI L., UZAL B., BEKTAS F.**, 'Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements', *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, N°6, 2005, pp. 1106-1111.
- [71] **UZAL B., TURANLI L.**, 'Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans', *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, N°11, November 2003, pp. 1777-1781.
- [72] **DIAMANTONIS N., MARINOS I., KATSIOTIS M.S., SAKELLARIOU A., PAPATHANASIOU A., KALOUIDAS V., KATSIOTI M.**, 'Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete', *Construction and Building materials*, Vol. 24, N° 8, 2010, pp. 1518-1522.

- [73] **FELEKOGLU B., TÜRKEL S., KALYONCU H.**, 'Optimization of fineness to maximize the strength activity of high-calcium ground fly ash – Portland cement composites', *Construction and Building Materials*, Vol. 23, N° 5, May 2009, pp. 2053-2061.
- [74] **UYSAL M., SUMER M.**, 'Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures', *Construction and Building Materials*, Vol. 25, N° 11, 2011, pp. 4112-4120.
- [75] **UYSAL M., YILMAZ K.**, 'Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete', *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33, N° 7, 2011, pp. 771-776.
- [76] **VEJMELKOVÁ E., KEPPERT M., GRZESZCZYK S., SKALIŃSKI B., ČERNÝ R.**, 'Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag', *Construction and Building Materials*, Vol. 25, N° 3, 2011, pp. 1325-1331.
- [77] **MELO K. A., CARNEIRO A. M.P.**, 'Effect of Metakaolin's finesses and content in self-consolidating concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 24, N°8, 2010, pp. 1529-1535.
- [78] **DACZKO J.A.**, 'A comparison of passing ability test methods for Self-Consolidating Concrete', 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 335-344.
- [79] **BARBHUIYA S.**, 'Effects of fly ash and dolomite powder on the properties of self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*, Vol. 25, N° 8, 2011, pp. 3301-3305.

- [80] **SONEBI M., GRÜNEWALD S. AND WALRAVEN J.**, 'Filling ability and passing ability of Self-Compacting Concrete', *ACI Materials Journal*, 2007, pp. 162-170.
- [81] **BORSOI A., COLLEPARDI M., COLLEPARDI S., TROLI R. AND ZANARDI L.**, 'Low-Heat, High-Strength, Durable Self-Consolidating Concretes', 9th CANMET/ACI International Conference on recent Advances in Concrete Technology, Warsaw, Poland, 2007, pp. 399-409.
- [82] **LACHEMI M., HOSSAIN K., PATEL R., SHEHATA M., BOUZOUBAA N.**, 'Influence of paste/ mortar rheology on the flow characteristics of high-volume fly ash self consolidating concrete', *Mag Concr Res*, 2007, Vol. 59, N° 7, pp. 517–28.

ANNEXE A

GENERALITE SUR LE BROYAGE

A.1. Définition

Le broyage consiste à fragmenter la matière jusqu'à l'obtention d'une poudre, pour favoriser les réactions des éléments chimiques. La charge d'un broyeur est constituée généralement des boulets sphériques en acier forgé dont le diamètre peut varier de 30 à 125mm selon les dimensions du produit à broyer et à la granulométrie recherchée à la sortie.

A.2. Type de broyeur

a) broyeur à meules ou broyeur à galets

Du point de vue technique, ce broyeur entre dans la catégorie des broyeurs à force extérieurs c'est-à-dire que les éléments broyeurs sont pressés positivement sur le lit de matière. L'élément broyeur est constitué par des galets qui roulent librement dans cette auge rotative ou ils sont pressés sur la matière par l'intermédiaire d'un dispositif approprié. Les galets de broyeur, relativement grands, sont raccordés à un anneau stationnaire, de telle façon qu'il dévie vers le haut ou oscille radialement. La matière à broyer est introduite soit latéralement ou verticalement et tombe dans l'auge de mouture par le centre des anneaux. Ce type de broyeur est limité à l'utilisation du broyage de matière des caractéristiques d'humidité < 20%, abrasivité 6%.

b) broyeur à boulets

Ces appareils ont pour rôle de transformer les matières grossières en poudres très fines. Les broyeurs à boulets sont nés de l'observation de l'action réciproque des galets au bord de la mer qui brassés par les vagues, réduisent en s'entrechoquant, les grains de sable en grains de plus en plus fins, en même temps que leurs usures leur donnent une forme plus au moins sphérique.

c) broyeur aérofall

Ce broyeur est constitué d'une vérole de grand diamètre et de faible longueur montée sur deux tourillons creux, le rapport diamètre/longueur (dimension interne) est de l'ordre de 2,5 à 4,2 suivant la taille du broyeur.

Cet appareil est équipé de deux sortes de blindages :

- Des rails de relevage garnissant la périphérie du broyeur,
- Des blindages déflecteurs garnissant les cotés verticaux du broyeur.

A.3. Type d'installation

Il existe deux types d'installation de broyage :

- Broyage à circuit ouvert,
- Broyage à circuit fermé.

a) Broyage en circuit ouvert

Les premières installations étaient faites de deux broyeurs en cascades, le premier broyeur appelé préparateur ayant pour fonction de triturer la matière, et un deuxième broyeur appelé finisseur, ayant pour fonction de rendre la matière préparée la plus fine possible.

▪ Avantages

- Procéder de broyage simple
- Chaque broyage pouvant : / avoir le diamètre optimal / tourner à la vitesse optimale pour l'action demandé aux corps bruyants.

▪ Inconvénients

- Installation coûteuse,
- débit faible,
- produit fini incontrôlable.

b) Broyage en circuit fermé

Dans ce type de circuit, l'atelier n'est plus limité à l'installation du broyeur, mais à une installation, plus complexe nécessitant l'adjonction d'autres appareils ; appareil de classification du produit fini (séparateur), Appareil de manutention du produit (élévateurs, vis, aéroglissière).

▪ Avantages

- Sélection plus soignée
- Augmentation sensible du débit
- Plus de production

▪ Inconvénients

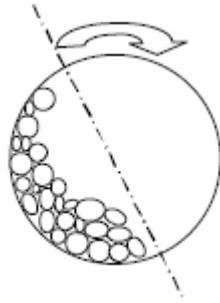
- Plus cher à l'achat
- Réglage difficile

A.4. Théorie de broyage

Broyer c'est réduire un morceau ou particule en plusieurs morceaux, particules plus petites et suivant la loi de RITTINGER (ISO7) qui se vérifie constamment. La puissance nécessaire pour la réduction des éléments est directement proportionnelle à la nouvelle surface obtenue.

D'après la loi de RITTINGER, la puissance employée pour réduire en 64 morceaux de 1cm d'arrête sera double de celle employée pour faire les morceaux de 2 cm d'arrêtes. Donc pour obtenir un laitier ou un ciment à 6000 cm²/gr il faudra théoriquement une puissance double que pour un laitier ou ciment à 3000 cm²/gr.

A.5. Fonctionnement du broyeur



Vitesse normale :

entraînement des boulets par la paroi, puis chute



Vitesse excessive :

centrifugation des boulets contre la paroi

Figure A.1 : Fonctionnement du Broyeur

- Si la force centrifuge est égale au poids de boulet, il y a centrifugation,
- Les engins broyant sont entraînés dans la rotation du broyeur à une vitesse de rotation voisine de 75% de la vitesse critique.

ANNEXE B

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU MORTIER

B.1. Les Données

Pour un volume du mortier de $V=1.3$ l (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment : $\rho_C=3050$ kg/m³
- Sable : $\rho_S=2560$ kg/m³
- Superplastifiant : $\rho_{Sp}=1070$ kg/m³
- Eau : $\rho_E=1000$ kg/m³

Coefficient d'absorption du sable $A_b= 1.1\%$

On fixe le rapport Sable/Mortier $S/M = 0.50$

On fixe le rapport (par poids) $E/C = 0.40$ ou (par volume) $E/C = 1.22$

Le superplastifiant (MEDAFOW 30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : $\%Sp = 1,8\%$ du poids de ciment (ou poudres).

B.2. Calcul d'humidité du sable

On pèse un échantillon de sable par exemple de masse $M_1=300$ g (par exemple), on le met dans l'étuve à 105°C pendant 8 minutes puis on le pèse une deuxième fois on obtient une masse $M_2 = 295$ g et on calcul l'humidité du sable μ_s

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

Donc le sable contient une certaine quantité d'eau qu'on doit retrancher de son coefficient d'absorption on l'appelle correction :

$$\text{Correction} = \mu_s - A_b$$

B.3. Calcul des quantités de chaque constituant

B.3.1. Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment C% :

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

La quantité de ciment C en kg :

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

B.3.2. Le Sable

La quantité du sable en kg est S :

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

B.3.3. Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est Sp :

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

B.3.4. L'eau

L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties une première partie E₁, qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E₂ (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

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

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

La quantité d'eau globale E en litre :

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

Eau1 $E_1 = E \times 0.70$

Eau2 $E_2 = E \times 0.30$

Tableau B.1 : Feuille Excel donnant composition et résultats des essais sur mortier

Essais sur Mortier					Entrer data dans cellules en rouge Valeurs calculées dans cellules en noir
Référence du mélange	Essai 1	CEMI 42,5 (LAFARGE)	Date	20/03/2011	
volume de mortier (litres)	1,3	substitué par la Pouzzolane naturel Algérien à X%			
sable/mortier par volume	0,5				
E/P par vol.	1,2200	poudre vol (%)	Eau volume (%)	27,48	
E/P par poids	0,4000				
composition Poudre(vol %)					
ciment portland	100				
pouzzolane	0				
superplast - MEDAFLOW30	1,8	% (Sp/P)			
humidité sable					
poids humide (gms)	300	humidité (%)	absorption (%)	correction (%)	
poids sec (gms)	295	1,7	1,1	0,6	
Matériaux/Type	vol litres	densité kg/m ³	contenance d'eau kg	contenance d'eau %	contenance d'eau kg
ciment	0,293	3050			0,893
Pouzzolane	0,000	2810			0,000
Eau	0,357	1000	0,357 total		0,336
superplast - MEDAFLOW30		1070	0,016	70	0,011
Sable	0,650	2560	1,664	0,6	0,010
Total	1,300				1,674
		E/P par poids =	0,4000		2,919

ANNEXE C

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON

Les mêmes démarches de la composition du mortier (Annexe A) sont suivies pour la composition du béton autoplaçant.

C.1. Les Données

Pour un volume de béton de $V=20$ litres (par exemple)

- Les masses volumiques :
 - ❖ Masse volumique apparente du gravier : $\rho_G = 1470 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique absolue du gravier : $\rho_{AG} = 2715 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique absolue du sable : $\rho_S = 2560 \text{ kg/m}^3$
 - ❖ Masse volumique absolue du ciment : $\rho_C = 3050 \text{ kg/m}^3$
- Les coefficients d'absorption :
 - ❖ Coefficient d'absorption du sable : $Ab_S = 1.1\%$
 - ❖ Coefficient d'absorption du gravier : $Ab_G = 0,5\%$
- Le rapport Sable/Mortier : $S/M = 0.50$
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G(\text{kg/m}^3) = \frac{\rho_G \times 50}{100}$$

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : $A=1\%$ du volume du béton
- Le rapport Eau/Ciment est de $E/C_{\text{volume}}=1.22$ par unité de volume de ciment et

$$E/C_{\text{poids}} = E/C_{\text{volum}} / \rho_A = 0.4$$
 par unité de poids de ciment.
- Le pourcentage de superplastifiant (MEDAFLOW30) : $\%Sp= 1,8\%$ du poids de ciment, le MEDAFLOW30 est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau).

C.2. Calcul d'humidité

Comme on doit calculer l'humidité du sable pour la composition du mortier, dans la composition du béton on doit calculer l'humidité du sable et du gravier aussi pour apporter les corrections nécessaires à la formulation.

On prend un échantillon de sable de masse M_1 et un échantillon de gravier de masse M'_1 et on les met dans l'étuve réglée à 105°C pour une durée de 6 minutes pour le gravier et une durée de 8 minutes pour le sable, puis on pèse M_2 et M'_2 les masses respectives du gravier et du sable.

L'humidité du sable :

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

L'humidité du gravier :

$$\mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$$

C.3. Calcul des différents composants

C.3.1. Gravier

La quantité G en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton V :

$$G(\text{kg}) = \frac{G(\text{kg} / \text{m}^3) \times V}{1000} \left(1 + \frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

C.3.2. Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (%G), le pourcentage du mortier par rapport au béton (%M) puis le pourcentage du sable dans le béton (%S) pour arriver à la quantité du sable dans un volume V de béton (S) :

Le pourcentage du gravier G dans le béton :

$$\%G = \frac{G(\text{kg} / \text{m}^3)}{\rho_{AG} \times 10}$$

Le pourcentage du volume de mortier M par rapport au volume de béton :

$$\%M = 100 - \%G - \%A$$

Le pourcentage du sable S dans le béton :

$$\%S = \frac{\%M \times S / M}{100}$$

Quantité du sable S en (kg) pour un volume V de béton :

$$S(\text{kg}) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left(1 + \frac{\mu_S - A_{bS}}{100} \right)$$

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition.

C.3.3. Ciment

Pourcentage de volume pâte dans le béton (%P) :

$$\%P = \%M - \%S$$

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

$$\%C = \frac{1}{1 + E / C_{\text{volume}}} \times \%P$$

La quantité de ciment C en (kg) pour un volume V de béton :

$$C(\text{kg}) = \%C \times \rho_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

C.3.4. Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton Sp (kg/m³)

$$Sp(kg / m^3) = \frac{\%Sp}{100} \times \%C \times \rho_C \times 10$$

La quantité de superplastifiant Sp en (kg) pour un volume V de béton :

$$Sp(kg) = Sp(kg / m^3) \times V$$

C.3.5. Eau

L'eau ajoutée au béton (E) est divisée en deux parties : la première partie (E_1) est de 70% de (E) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (E_2), elle de 30% de (E) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

Le pourcentage d'eau dans le béton (%E) :

$$\%E = \frac{E / C_{volume}}{1 + E / C_{volume}} \times \%P$$

Calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau (e) doit être extraite :

L'eau contenue dans le sable : e_1

$$e_1(kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left(\frac{\mu_S - A_{bS}}{100} \right)$$

L'eau contenue dans le gravier : e_2

$$e_2(kg) = \frac{G(kg / m^3) \times V}{1000} \left(\frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

L'eau contenue dans le superplastifiant : e_3

$$e_3 = \frac{Sp(kg) \times 80}{100}$$

L'eau à extraire e :

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume V de béton :

$$E(kg) = \frac{\%E \times 10 \times V}{1000} - e$$

Avec :

Eau1

$$E_1(kg) = 0.70 \times E$$

Eau2

$$E_2(kg) = 0.30 \times E$$

