

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA**

Faculté des sciences de l'ingénieur  
Département de génie civil  
Laboratoire Géomatériaux & Génie Civil



**MEMOIRE DE MASTER**

Spécialité : Génie Civil

Option: Structures & Matériaux

**DURABILITE DU BETON AUTOPLAÇANT A BASE D'UN CIMENT A  
LA POZZOLANE NATURELLE**

Présenté par :

**BENAMAROUCH Bilel**

**IDIR Laid**

Sous la direction de :

A. BOUIKNI Maitre de conférences, USD Blida

B. MENADI Maitre de conférences, USD Blida

Promoteur

Co-Promoteur

Blida, Septembre 2012

## ملخص

تعتبر الخرسانة المرصوفة ذاتيا خرسانة خاصة، جد سائبة تتموضع وتتراص تحت أثر الجاذبية. فضلا عن ذلك يجب أن تنطوي هذه الخرسانة على خصائص متجانسة دون أي تفرقة لموادها. لأسباب تقنية واقتصادية وأسباب لها علاقة بالمحيط تم استبدال كمية من الإسمنت بإضافات إسمنتية. تعمل هذه الدراسة على تحليل الخصائص الانسيابية، مقاومة الانضغاط وديمومة الخرسانة المرصوفة ذاتيا (خ.م.ذ) المركبة أساسا من مادة البوزولان الطبيعية من الفجوة البركانية المتواجدة ببني صاف ومن الإسمنت المركب من نوع CEM II 42.5 ل الذي يحتوي على 10% من الكلس. تم استعمال البوزولان الطبيعية ذو نعومة 3500 سم<sup>2</sup>/غ بنسب مختلفة (0، 10، 15، 20 و 25%) كاستبدالات بوزن الإسمنت، لقد تم استعمال طريقة دومون من أجل تكوين الخرسانة المرصوفة ذاتيا التي تم تشكيل تركيبها من خلال النسب التالية :

الماء/الرابط = 0.40، حصى/رمل = 1، رمل/ملاط = 0.50 ومعايرة من الملدن الفعال بـ 1.8% من وزن الإسمنت. يظهر بأن نسبة الاستبدال المقدرة بـ 10% كان لها الأثر الأكثر إيجابية على الخصائص الإنسيابية للخرسانة المرصوفة ذاتيا. تنقص مقاومة الضغط بوجود البوزولان الطبيعية، لكنها تعود من جديد قابلة للمقارنة مع المقاومة المرجعية على المدى الطويل، بعد 28 يوما. إلا أن نتائج الديمومة لنفاذية الماء وامتصاص الماء من خلال الخاصية الشعرية لمدة 28 يوما أظهرت بأن هناك اختلاف ضئيل بين الخرسانة المرصوفة ذاتيا المركبة بنسبة 10% من البوزولان الطبيعية و الخرسانة المرجعية.

**الكلمات المفاتيح :** الخرسانة المرصوفة ذاتيا، ملدن فعال، البوزولان الطبيعية، انسيابية، مقاومة الضغط، الديمومة.

## RÉSUMÉ

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se compactent sous le seul effet de la gravité. En plus, Ces bétons doivent aussi présenter des propriétés homogènes et aucune ségrégation. Pour des raisons techniques, économiques et environnementales des ajouts cimentaires sont substitués au ciment. Cette étude analyse les propriétés rhéologiques, la résistance à la compression et la durabilité des bétons autoplaçants (BAP) à base de la pouzzolane naturelle de beni-saf et d'un ciment composé du type CEM II 42.5 L, contenant 10% de calcaire. La pouzzolane naturelle d'une finesse de  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$  a été utilisé à différents pourcentages (0, 10, 15, 20, 25%) de substitution en poids du ciment. La méthode DOMONE a été utilisée pour formuler le béton autoplaçant dont la composition a été faite avec des rapports: Eau/Liant fixe ( $E/L=0,40$ ), Gravier/Sable ( $G/S=1$ ), Sable/Mortier ( $S/M=0,50$ ) et un dosage en superplastifiant à 1,8% du poids de ciment. Le taux de substitution de 10% semble donner l'effet le plus favorable sur les caractéristiques rhéologiques du BAP. La résistance à la compression diminue en présence de la pouzzolane naturelle, mais redeviennent comparables à celles de référence à long terme, au delà de 28 jours. Cependant, les résultats de durabilité de la perméabilité à l'eau et de l'absorption capillaire à l'âge de 28 jours ont montré une légère différence entre le béton autoplaçant à base de 10% de la pouzzolane naturelle et le béton autoplaçant de référence.

**Mots clés :** Béton Autoplaçant, Superplastifiant, pouzzolane naturelle, Rhéologie, Résistance à la compression, Durabilité.

## **ABSTRACT**

Self-compacting concretes are special concretes, highly flowable, which can flow into place under its own weight and compacted without any external vibration. In addition, these concretes must also have homogeneous properties and no segregation. For technical, economical and environmental reasons, cementitious materials (SCMs) are substituted for cement. This study investigates the rheological properties, the compressive strength and durability of self compacting concrete (SCC) containing natural pouzzolane of beni-saf and blended cement CEM II 42.5 L, containing 10% limestone. Natural pouzzolane with a fineness of 3500 cm<sup>2</sup> /g has been used at different percentages (0, 10, 15, 20, and 25%) as partial cement replacement (by weight of cement). DOMONE method was used to formulate SCC mixtures with constant: water to binder ratio ( $w / b = 0.40$ ), gravel to sand ratio ( $G / S = 1$ ), sand to mortar ratio ( $S / M = 0.50$ ) and a superplasticizer dosage of 1.8% by weight of cement. The substitution content of 10% natural pouzzolane seems to give the most favorable effect on the rheological characteristics of SCC. The compressive strength decreases with increasing slag content at early and short-term, but becomes comparable at long-term, beyond the age of 28 days. However, the durability results of the water permeability and capillary water absorption at the age of 28 days showed a slight difference between the self compacting concrete containing 10% of natural pouzzolane and the SCC control.

**Keywords:** Self Compacting Concrete, Superplasticizer, natural pouzzolane, Rheology, Compressive Strength, Durability.

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce modeste travail, on tient d'abord à remercier en premier lieu ALLAH le miséricordieux qui nous a donné du courage et de la volonté avec lesquels ce mémoire a été achevé.

Nos gratitude vont aussi à notre Promoteur Monsieur BOUIKNI Ammer, Maitre de Conférences à l'Université de Blida. Ici on écrit ce que on devrait dire avant d'écrire : merci beaucoup monsieur de nous avoir guidés et suivis. A souligner que son aide dans la partie expérimentale nous a été d'une grande utilité dans la réalisation de nos travaux.

Un grand merci à notre Co-Promoteur Monsieur Menadi Belkacem, Maitre de Conférences à l'Université de Blida pour son aide, pour la confiance qu'il faisait en nous et également pour sa gentillesse et sa modestie, ainsi qu'à Monsieur KENAI S., Professeur à l'Université de Blida pour ses conseils lors des réunions.

Un grand merci à tous les enseignants de Département de Génie Civil qui ont contribué à notre formation.

Nos remerciements vont aussi à Monsieur Fortas Abdelkader, laborantin de laboratoire de Géomatériaux du Département de Génie Civil de l'Université de Blida pour son aide précieuse et son soutien permanent.

On voudrait 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.

Merci à tous nos collègues de travail, Hasnaoui Hamza, Boumenir Ahlem, ainsi qu'à nos amis de promotion, pour leur aide et leur soutien moral. On n'oubliera pas tous les moments que nous avons traversés ensemble.

Nos vifs remerciements pour nos familles, en particulier nos parents qui nous ont soutenus durant nos études et qui nous ont toujours encouragés. Leur générosité est inestimable. Merci aussi à tous nos amis.

On terminerait en remerciant tous ceux et toutes celles qui ont contribué, de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## TABLE DES MATIERES

### Résumé

### Remerciements

### Table des matières

### Liste des figures et des tableaux

### Liste des symboles et des abréviations

### Introduction générale..... 18

### **Chapitre I : Le Béton Autoplaçant – Etude bibliographique**

1.1 Généralités.....	20
1.2 Spécificité de la composition des bétons autoplaçants.....	20
1.3 Avantages du BAP.....	21
1.4 Constituants des bétons autoplaçants.....	22
1.4.1 Le ciment.....	23
1.4.2 Les ajouts minéraux.....	23
1.4.3 Les granulats.....	24
1.4.4 L'eau de gâchage.....	24
1.4.5 Adjuvants des bétons.....	24
1.5 Formulation des bétons autoplaçant.....	26
1.5.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers.....	26
1.5.2 Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte.....	26
1.5.3 Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire.....	28
1.5.4 Méthode basée sur un plan d'expérience.....	28
1.5.5 L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE.....	28
1.6 Principe et application des approches.....	29
1.6.1 Approche japonaise ou la méthode générale.....	29
1.6.2 Approche suédoise (CBI).....	29
1.6.3 Approche du laboratoire central des ponts et chaussées LCPC.....	29
1.7 Caractérisation du BAP a l'état frais.....	30
1.7.1 Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP.....	30
1.7.2 Lois du comportement rhéologique des BAP.....	32
1.8 Propriétés des BAP à l'état durci.....	35
1.8.1 Résistance à la compression.....	35

1.8.2	Résistance à la traction.....	36
1.8.3	Module d'élasticité.....	37
1.8.4	Le retrait.....	38
1.8.4.1	Retrait thermique.....	38
1.8.4.2	Retrait endogène.....	38
1.8.4.3	Retrait plastique.....	39
1.8.4.4	Retrait de dessiccation.....	40
1.8.5	Déformation sous charge (fluage).....	42
1.9	Durabilité.....	43
1.8.1	Perméabilité aux gaz.....	43
1.8.2	Diffusion des ions chlore.....	44
1.8.3	Absorption capillaire.....	46
1.8.4	Carbonatation.....	48
1.8.5	Résistance aux sulfates et aux acides.....	49
1.8.6	Résistance aux cycles de gel-dégel.....	50
1.9	Conclusion.....	52

## **Chapitre II : Matériaux et essais**

2.1	Introduction.....	53
2.2	Caractérisation des matériaux.....	53
2.2.1	Le ciment.....	53
2.2.2	La pouzzolane naturelle.....	54
2.2.3	Les granulats.....	55
2.2.3.1	Le sable.....	55
2.2.3.2	Le gravier.....	56
2.2.4	L'eau de gâchage.....	57
2.2.5	Le superplastifiant.....	57
2.3	Formulation adoptées.....	57
2.3.1	formulation du mortier.....	58
2.3.2	formulation du béton autoplaçant.....	59
2.4	Caractérisation du MAP à l'état frais.....	61
2.4.1	Essai d'étalement au Mini-Cône.....	61
2.4.2	Essai de l'entonnoir en V (V-funnel test).....	61
2.5	Essais effectués sur béton à l'état frais.....	62

2.5.1	Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow).....	62
2.5.2	Essai d'entonnoir en V (V-funnel test).....	64
2.5.3	Essai de la boîte en L (L-Box test).....	65
2.5.4	Essai de stabilité au tamis.....	66
2.6	Essais effectués sur béton durci.....	68
2.6.1	Essai de compression.....	68
2.6.2	Essai d'absorption capillaire.....	68
2.6.3	Essai de perméabilité à l'eau.....	69
2.7	Conclusion.....	70
 <b>Chapitre III : Résultats expérimentaux et interprétation</b>		
3.1	Introduction.....	71
3.2	Optimisation de dosage du Superplastifiant.....	71
3.2.1	Etalement au mini-cône pour les mortiers.....	72
3.2.2	Temps d'écoulement à l'entonnoir en V.....	73
3.3	Effet de la pouzzolane naturelle sur l'ouvrabilité du BAP.....	74
3.3.1	Etalement et temps $T_{50}$ au cône d'Abrams.....	75
3.3.1.1	Effet de la PZN.....	77
3.3.2	Temps d'écoulement au V-Funnel.....	78
3.3.3	Résultats de L-Box.....	80
3.3.4	Résistance à la ségrégation par tamisage.....	83
3.4	Effet de la teneur en PZN sur les propriétés des BAP à l'état durci.....	84
3.4.1	Résistance à la compression.....	84
3.4.2	Perméabilité à l'eau.....	86
3.4.3	Absorption d'eau par capillarité.....	87
3.5	conclusion.....	91
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>		92
<b>Références bibliographiques.....</b>		94
Annexe A : Exemple de calcul de la composition du mortier.....		101
Annexe B : Exemple de calcul de la composition du béton.....		104

## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

### Liste des Figures

Figure 1.1	Phénomène de blocage (ségrégation). .....	21
Figure 1.2	Composition d'un béton ordinaire et d'un BAP .....	22
Figure 1.3	Phénomène de défloculation .....	25
Figure 1.4	Notion d'excès de pâte : La pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).....	27
Figure 1.5	Courbe de comportement rhéologique pour les corps fluides .....	32
Figure 1.6	Fluide newtonien.....	33
Figure 1.7	Fluide de Bingham.....	34
Figure 1.8	Modèle de Herschel-Belkley.....	34
Figure 1.9	Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton.....	35
Figure 1.10	Variation des résistances mécaniques en compression de BAP en fonction de la composition du liant .....	36
Figure 1.11	Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant.....	36
Figure 1.12	Comparaison des modules d'élasticité d'après les codes de construction de BAP et de béton vibrés avec leurs valeurs expérimentales .....	37
Figure 1.13	Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP.....	39
Figure 1.14	Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure (T = 20°C, 50% HR).....	40

Figure 1.15	Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés dérivés .....	40
Figure 1.16	Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP.....	41
Figure 1.17	Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant.....	41
Figure 1.18	Fluage de bétons chargés à 28 jours et conservés à différents degrés d'humidité relative.....	42
Figure 1.19	Coefficient de perméabilité à l'oxygène de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés correspondants.....	44
Figure 1.20	Comparaison des coefficients de diffusion des ions chlore entre BAP et bétons vibrés.....	45
Figure 1.21	Coefficient de migration des ions chlore de trois BAP (SCC) et de deux bétons vibrés correspondants.....	45
Figure 1.22	Coefficients de diffusion de BAP (SCC) et de bétons vibrés (TC).....	46
Figure 1.23	Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés.....	47
Figure 1.24	Profondeur de carbonatation des BAP (SCC) et des bétons vibrés de même rapport E/C.....	48
Figure 1.25	Résistance résiduelle en compression après 90 cycles de gel-dégel.....	51
Figure 1.26	Résistance résiduelle en traction après 90 cycles de gel-dégel.....	51
Figure 2.1	scories de la pouzzolane naturelle [(a) avant broyage, (b) après broyage].....	54
Figure 2.2	Broyeur à boulets .....	55
Figure 2.3	Variation de la finesse de la PZN en fonction du temps de broyage.....	55
Figure 2.4	courbes granulométriques des sables et des graviers.....	57

Figure 2.5	Séquence de malaxage du mortier .....	59
Figure 2.6	Malaxeur de mortier .....	59
Figure 2.7	Séquence de malaxage du BAP.....	60
Figure 2.8	Malaxeur de béton .....	60
Figure 2.9	Essai d'étalement pour mortier .....	61
Figure 2.10	Essai à l'entonnoir en V pour mortier .....	62
Figure 2.11	Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow).....	63
Figure 2.12	Mesure du diamètre d'étalement.....	63
Figure 2.13	Essai d'entonnoir (v-funnel).....	65
Figure 2.14	Essai L-Box.....	66
Figure 2.15	Essai de résistance à la ségrégation au tamis.....	67
Figure 2.16	Essai de compression [(a) éprouvette avant compression, (b) éprouvette après compression].....	68
Figure 2.17	Essai d'absorption capillaire.....	69
Figure 2.18	Perméabilimètre a l'eau.....	70
Figure 2.19	Découpage des éprouvettes.....	70
Figure 2.20	Mesure de pénétration d'eau.....	70
Figure 3.1	Variation d'étalement en fonction du dosage du superplastifiant.....	72

Figure 3.2	(a) dosage de 1.8% de SP. (b) dosage de 2.1% de SP.....	73
Figure 3.3	Variation de temps d'écoulement en fonction du dosage du superplastifiant.....	74
Figure 3.4	Etalement en fonction de la teneur en PZN .....	76
Figure 3.5	Temps $T_{50}$ en fonction de la teneur en PZN .....	76
Figure 3.6	Galette du BAP 1 (10% de PZN).....	77
Figure 3.7	$T_{V-Funnel}$ en fonction de la teneur en PZN.....	79
Figure 3.8	Rapport $H_2/H_1$ en fonction de la teneur en PZN.....	80
Figure 3.9	Temps $T_{20}$ en fonction de la teneur en PZN.....	82
Figure 3.10	Temps $T_{40}$ en fonction de la teneur en PZN.....	82
Figure 3.11	laitance en fonction de la teneur en PZN.....	83
Figure 3.12	Variation de la Résistance à la Compression en fonction du Temps.....	85
Figure 3.13	Profondeur de pénétration d'eau des deux bétons à 28 jours ( $E/L=0.40$ ). .....	87
Figure 3.14	Absorption d'eau capillaire en fonction du temps des deux bétons étudiés à 28 jours ( $E/L = 0.40$ ).....	89
Figure 3.15	Taux initial d'absorption d'eau en fonction du temps (BAP 0).....	89
Figure 3.16	Taux initial d'absorption d'eau en fonction du temps (BAP 10).....	90
Figure 3.17	Taux secondaire d'absorption d'eau en fonction du temps (BAP 0).....	90
Figure 3.18	Taux secondaire d'absorption d'eau en fonction du temps (BAP 10).....	91

**Liste des Tableaux :**

Tableau 1.1	Absorption d'eau par immersion et par capillarité de sept BAP (SCC) et d'un béton vibré (TC).....	47
Tableau 1.2	Valeurs expérimentales du coefficient K, en $\text{mm.an}^{1/2}$ , pour deux expositions différentes.....	49
Tableau 2.1	Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.....	53
Tableau 2.2	Caractéristiques des sables.....	56
Tableau 2.3	Caractéristiques de gravier.....	56
Tableau 2.4	Classification des BAP selon domaine d'utilisation.....	64
Tableau 2.5	Critères de stabilité.....	67
Tableau 3.1	Composition des mortiers pour différents pourcentages de SP/L.....	72
Tableau 3.2	valeurs d'étalement en fonction du dosage du superplastifiant.....	72
Tableau 3.3	valeurs de temps d'écoulement en fonction du dosage du superplastifiant.....	73
Tableau 3.4	composition des BAP testés.....	75
Tableau 3.5	valeurs d'étalements et du temps $T_{50}$ au cône d'Abrams.....	75
Tableau 3.6	valeurs de temps d'écoulement au V-Funnel ( $T_{V\text{-Funnel}}$ ).....	78
Tableau 3.7	valeurs du rapport $H_2/H_1$ de l'essai L-Box.....	80

Tableau 3.8	valeur de $T_{20}$ et $T_{40}$ de l'essai L-Box.....	81
Tableau 3.9	valeurs de laitance.....	83
Tableau 3.10	Résultats de la résistance à la compression des bétons autoplaçants.....	84
Tableau 3.11	Valeurs de la profondeur de pénétration d'eau sous pression des deux bétons.....	87
Tableau 3.12	Valeurs moyennes d'absorption d'eau des deux bétons.....	88

## **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
BO	Béton ordinaire
BPE	Béton prêt à l'emploi
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)

*Liste des symboles et des abréviations*

---

E/C	Eau/Ciment
E/L	Eau/Liant
$E_{\text{eff}}$	La quantité d'eau efficace, (kg)
$E_{\text{vol}}$	Le pourcentage d'eau en volume, (%)
G	Gravier
G/S	Gravier/Sable
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LF/C	Limestone fillers / cement
MBE	Mortier de Béton Equivalent
MAP	Mortier autoplaçant
MOR	Mortier
NC	Normal Concrete
PC	Polycarboxylate
PZN	Pouzzolane naturelle
REF	Référence
$R_m$	Vitesse relative
S/M	Sable/Mortier
SCC	Self-Compacting Concrete
SF	Slump flow
SP	Superplastifiant
SP/L	Superplastifiant/Liant
SP/P	Superplastifiant/Poudre

*Liste des symboles et des abréviations*

---

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, ( $m^3$ ).
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
$W_{\text{eff}}$	Eau efficace
$W_{\text{eff}}/C$	Eau efficace / ciment
wt	Weight
$\gamma$	Le taux de cisaillement, ( $s^{-1}$ )
$\Gamma_m$	Etalement relatif
$\eta$	La viscosité, ( $Pa.s^{-1}$ )
$\eta_p$	la viscosité plastique, ( $Pa.s^{-1}$ )

## *Liste des symboles et des abréviations*

---

$\rho_{\text{abs}}$	Masse volumique absolue, (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{\text{app}}$	Masse volumique apparente, (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{\text{C}}$	Masse volumique du ciment, (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{\text{E}}$	Masse volumique d'eau, (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{\text{G}}$	Masse apparente du gravier, (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{\text{S}}$	Masse volumique du sable, (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{\text{SP}}$	Masse volumique du superplastifiant, (Kg/m <sup>3</sup> )
$\tau$	Contrainte de cisaillement, (Pa)
$\tau_0$	Seuil de cisaillement, (Pa)
$\Pi$	Pourcentage de laitance, (%)
%P	Le pourcentage du volume de pate dans le ciment, (%)
$\mu_{\text{G}}$	L'humidité du gravier, (%)
$\mu_{\text{S}}$	L'humidité du sable, (%)

## **INTRODUCTION GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

La majorité de la mise en place des bétons dépend du compactage afin d'assurer une résistance suffisante pour une bonne durabilité des ouvrages. Un compactage insuffisant induira une inclusion des vides donc une réduction de la force compressive, ce qui influe fortement sur la protection physique et chimique naturelle de l'acier de renforcement (enrobage) conférée par le béton.

Le béton ordinaire est normalement rendu compact manuellement en utilisant des vibrateurs, opérés par une main-d'œuvre peu qualifiée et un manque de surveillance et de coordination entre l'ingénieur concepteur et l'ingénieur chargé de l'exécution des travaux sur le chantier. Les conséquences du compactage affectent non seulement le matériel, mais ont aussi des effets sur la santé et la sécurité des opérateurs. Pour surmonter ces effets, l'idée de créer des bétons auto plaçant c'est-à-dire des bétons qui peuvent être mis en place sans vibration a été lancée vers le milieu des années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo, Depuis lors, des enquêtes pour établir une méthode de formulation de mélange raisonnable et auto-compactable ont été réalisées pour faire du BAP un béton standard.

Cette gamme de béton se caractérise par 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.

Malgré les avantages pratiques des bétons auto plaçant (grande ouvrabilité et déformabilité, stabilité appréciable, structures résistantes et durables), leur point faible réside dans leur coût qui est relativement plus élevé que les bétons ordinaires en raison de l'utilisation du superplastifiant ainsi qu'un dosage plus important en ciment, pour cela l'utilisation des additions minérales comme le laitier, la pouzzolane naturelle et le calcaire en tant que substitution du ciment réduit de manière significative le coût global du matériau.

En effet notre étude s'inscrit dans le contexte de valoriser l'utilisation de La pouzzolane naturelle qui est d'origine volcanique extraite du gisement volcanique situé à Beni-Saf de l'ouest Algérien, en étudiant son influence sur le comportement rhéologique du BAP. Le mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur le BAP, les caractéristiques de ces propriétés intrinsèques tels que sa formulation, ses propriétés mécaniques ainsi que sa durabilité.

Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés et à la formulation adoptée pour notre travail expérimental. Nous exposons les différents essais effectués sur le béton à l'état frais pour la caractérisation du BAP, et sur béton durci.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse et l'interprétation des résultats des essais réalisés.

On finira par une conclusion générale ainsi que des recommandations pour de futurs travaux.

## **CHAPITRE 1**

# **LE BÉTON AUTO-PLAÇANT ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## CHAPITRE I

### LE BETON AUTOPLAÇANT : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

#### 1.1 Généralité

Dans ce chapitre, on présente une synthèse bibliographique sur le BAP. Cette partie analyse les concepts de formulation de ces bétons, de leur caractérisation rhéologique à l'état frais, de leurs propriétés mécaniques à l'état durci, ainsi que certains indicateurs de durabilité.

Les bétons auto plaçant (BAP) sont des bétons très fluides, homogènes et stables. La caractéristique principale de ces bétons réside dans le fait qu'ils se mettent en place sans vibration et épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes sous le seul effet de la pesanteur.

L'idée de produire des bétons auto plaçant est apparue pour la première fois au Japon en 1988, le Japon fut le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique de fabrication du béton. [1]

L'intérêt des autres pays pour ce type de béton n'est apparu qu'après quelques années, mais il est en plein essor. En France le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) se penche sur la question au début des années 90.

En effet depuis son développement, le nombre d'ouvrages réalisés avec les bétons autoplaçants ne cesse d'augmenter surtout au Japon où l'utilisation de ce nouveau matériau est répandue dans le domaine de la construction.

#### 1.2 Spécificité de la composition des bétons autoplaçants

Les approches de composition des BAP sont basées sur les critères suivants : [2]

##### a) Une quantité de fines importante

Les compositions des bétons autoplaçants comportent une importante quantité de fines, (environ 500 kg/m<sup>3</sup> de diamètre inférieur à 80 µm) pour assurer la maniabilité et éviter les risques de ségrégations et de ressuage.

b) Un volume de pâte élevé

Le rôle de la pâte (ciment + eau efficace + air occlus + additions) est d'écarter les granulats, afin de diminuer les frottements qui provoquent la limitation vis-à-vis de l'étalement du béton et la capacité de remplissage des coffrages.

c) Utilisation de superplastifiants [3]

La maniabilité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Cet ajout ne doit pas être très élevé. Sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de ségrégation et du ressuage, on opte pour une éventuelle utilisation d'un rétenteur d'eau (agent de viscosité).

d) Un faible volume de gravillons [4]

Les risques de blocage (figure 1.1) pour un confinement donné augmentent avec l'augmentation des teneurs en gros granulats. Les BAP peuvent être réalisés avec des granulats roulés ou concassés, le diamètre maximal des gravillons dans un BAP étant compris entre 10 et 20 mm. Le rapport gravillons/sable pour les BAP est voisin de 1.

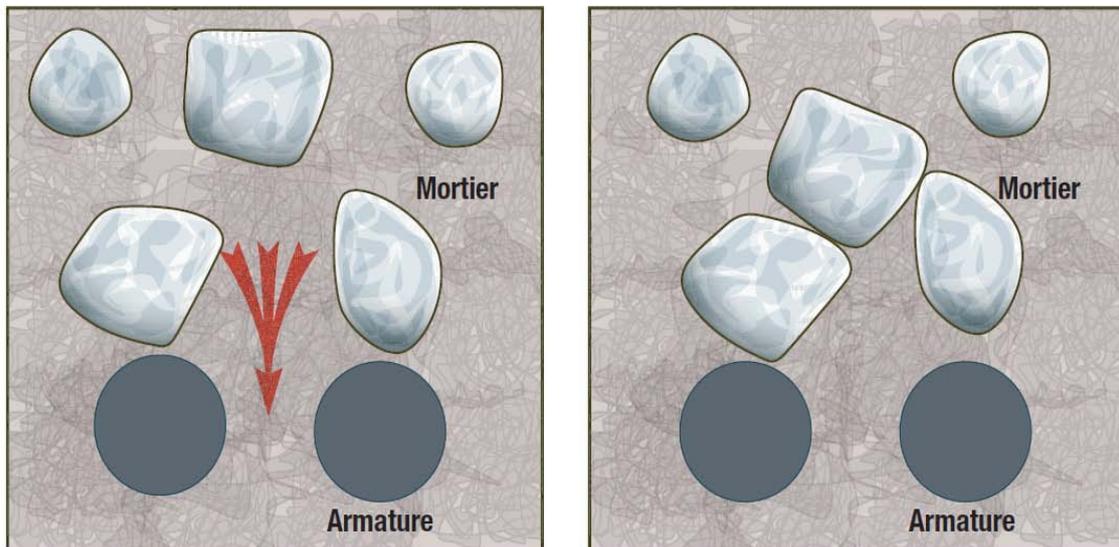


Figure 1.1 : phénomène de blocage (ségrégation).

### 1.3 Avantages du BAP [5]

#### a) Techniques

L'obtention d'une qualité, d'une régularité et d'une durabilité des bétons encore plus grandes.

Le coulage facilité de structures complexes et souvent fortement ferrillées.

L'allongement des temps d'ouvrabilité.

L'amélioration de la qualité esthétique des parements et un enrobage optimal.

L'obtention d'une parfaite planéité des hourdis et des dalles.

#### b) Socio-économiques

La suppression des opérations coûteuses en main d'œuvre (vibration, tirage à la règle, ragréage, etc.).

L'augmentation des cadences de production et de la productivité des chantiers et des usines.

La réduction de la pénibilité des tâches des ouvriers.

La réduction des nuisances sonores sur les chantiers.

La fabrication de ces bétons dans la majorité des centrales du réseau BPE et des usines de préfabrication à partir de matériaux courants disponibles localement.

La diminution des reprises de bétonnage.

### 1.4 Constituants des bétons autoplaçants

La figure ci-dessous illustre les constituants d'un BAP. (figure 1.2).

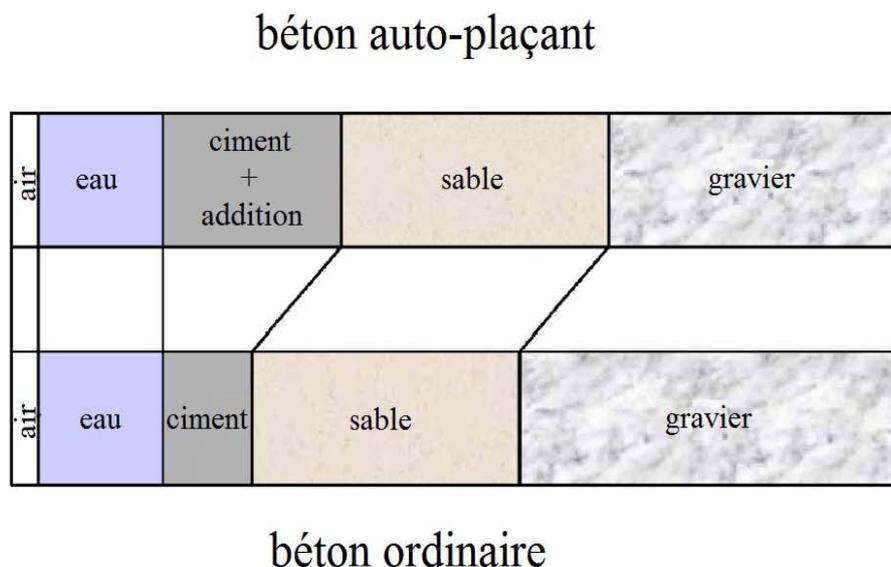


Figure 1.2 : Composition d'un béton ordinaire et d'un BAP [1].

#### 1.4.1 Le ciment

Les BAP peuvent être réalisés avec la plupart des ciments. Cependant, compte tenu des exigences de démoulage aux jeunes âges, les BAP utilisés dans l'industrie du béton contiennent presque toujours du ciment CPA-CEM I 52.5 ou 42.5.

#### 1.4.2 Les ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des matériaux finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. [6]

Ces ajouts ce sont principalement :

- des fillers calcaires (calcite, dolomite,...).
- des fillers siliceux.
- des laitiers de haut fourneau.
- des cendres volantes.
- des fumées de silice.

L'utilisation des ajouts minéraux à des bénéfiques : fonctionnels, économiques et écologiques : [7]

- Bénéfices fonctionnels

- L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Elles diminuent la demande en eau (à l'exception des particules très fines qui augmentent la demande en eau vu leur grande surface spécifique).
- La substitution d'une quantité de ciment par des fines diminue la chaleur d'hydratation dégagée lors de la confection du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

- Bénéfices économiques

- La majorité des ajouts minéraux sont des sous-produits de différentes industries (exploitation des déchets).

- Le remplacement du ciment qui est un grand consommateur d'énergie par des ajouts minéraux permet de réduire le coût du béton.

- Bénéfices écologiques

Le développement durable du béton permet entre autres de réduire l'émission des gaz à effet de serre. La production d'une tonne de ciment libère environ la même quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Le remplacement d'une partie de ciment par des ajouts cimentaires permettra de diminuer de façon systématique la quantité de CO<sub>2</sub> émise.

#### 1.4.3 Les granulats

Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, toutefois, comme pour un béton ordinaire, la forme des granulats a une influence sur le comportement rhéologique. Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés. Cependant pour le sable, et face au problème de surexploitation des gisements, il est préférable d'utiliser un sable concassé qu'un sable roulé.

Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats entre 16 mm et 20 mm. [8]

#### 1.4.4 L'eau de gâchage

L'eau utilisée en générale pour l'élaboration des bétons est l'eau du réseau public, il doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organique).

#### 1.4.5 Adjuvants des bétons [9]

Les adjuvants sont des produits chimiques qui incorporé dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre a des doses inférieure a 5% du poids du ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci.

- Les Superplastifiants

Un super plastifiant est un adjuvant qui, introduit dans un béton, un mortier ou un coulis, permet de réduire le dosage en eau et d'ajuster sa fluidité, ceci entraîne une augmentation de la résistance mécanique.

Les principaux superplastifiants sont à base de :

- copolymère formaldéhyde naphthalène sulfonate (PNS) ;
- copolymère formaldéhyde mélamine sulfonate (PMS) ;
- polymère avec fonction acrylate (PA) ;
- polymère avec des fonctions carboxylate (PC);
- monomère avec les fonctions phosphonate et/ou carboxylate (MPC). [10]

Les superplastifiants interagissent avec les particules de ciment et éventuellement avec les additions en s'adsorbant à leur surface ce qui permet d'éviter le phénomène de floculation au contact de l'eau. (figure 1.3).

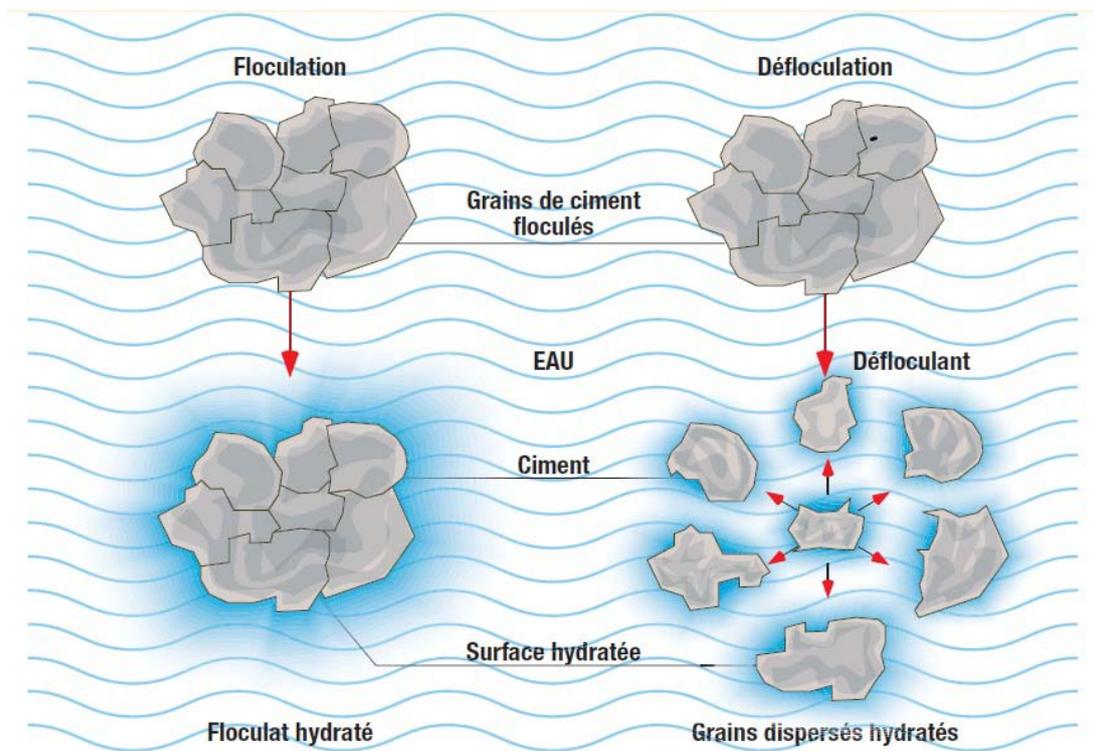


Figure 1.3 : phénomène de défloculation.

- Les agents de viscosité

L'agent de viscosité est un polymère qui interagit avec l'eau et rend la pâte du béton plus visqueuse. Une meilleure cohésion de la pâte permet de maintenir une distance entre les granulats, ce qui réduit leurs interactions de friction et de collision lors de l'écoulement du matériau et évite le phénomène de blocage au droit d'un obstacle.

## 1.5 Formulation des bétons autoplaçant

Il existe dans la littérature des techniques de formulation moins empiriques. En présente ci-dessous une revue des grandes familles d'approche :

### 1.5.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers

Cette méthode, proposée initialement par des chercheurs japonais OKAMURA, OUCHI, HAY, et NAG, elle permet l'obtention de formulation fortement dosée en ciment et conduit à des volumes de pâte importants. Les bétons qui en découlent sont sous dosés en granulats, surdoses en liant et économiquement peu viable.

La méthode repose sur les concepts suivants : [1]

- ✓ quantité de gravillons limitée a 50% de leur compacité (rapport entre le volume de grains le volume totale du système grains + vides) afin de minimiser les risques de blocage.
- ✓ volume de sable arbitraire de l'ordre de 40% du volume totale de mortier.
- ✓ rapport  $\frac{E}{poudre}$  et dosage en superplastifiant optimisés à partir d'essais sur mortiers en effectuant des essais d'étalement au mini-cône et V-funnel. Ces essais permettent de calculer deux paramètres :

$$\Gamma_m = \frac{(D)^2 - (D_0)^2}{(D_0)^2} \quad \text{Et} \quad R_m = \frac{10}{t} \quad (1.1)$$

Ou D est l'étalement,  $D_0$  est le diamètre inférieur du cône et t est le temps d'écoulement du mortier. Certains auteurs montrent que pour un BAP acceptable il faut avoir :  $\Gamma_m = 5$  et  $R_m = 1$ .

### 1.5.2 Méthodes basées sur l'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 (figure 1.4).

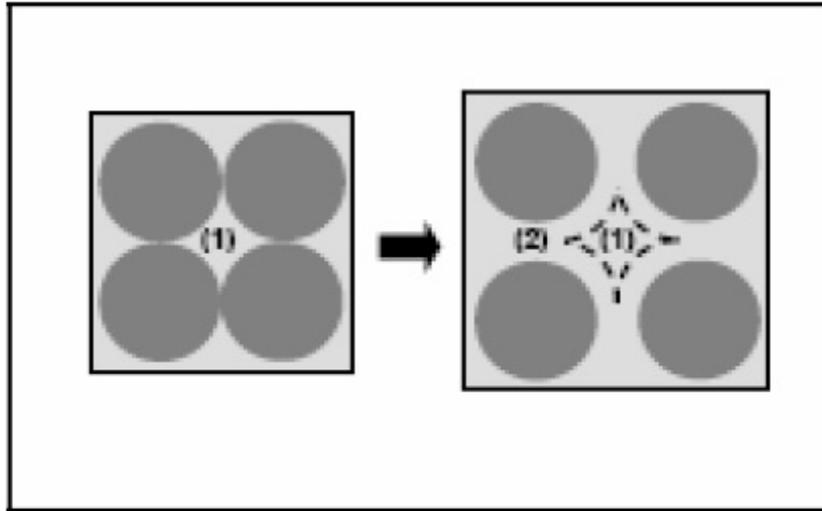


Figure 1.4 : notion d'excès de pâte : La pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2) [11].

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, exprimées par rapport à celles de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton.

Cette méthode a été développée par Van Bui et Montgomery consiste à minimiser la quantité de la pâte tout en répondant simultanément à deux critères :

- Fluidité de la pâte : ce critère conduit à définir un volume minimal de la pâte décrit par L'équation suivante :

$$V_{p\grave{a}te_{mini}} = 1 - \frac{1 - V_{vides}}{\left(\frac{e_{mini}}{D_{moyen}} + 1\right)^3} \quad (1.2)$$

Où  $D_{moyen}$  est le diamètre moyen des granulats (mm),  $e_{mini}$  est la distance minimale entre les granulats nécessaire pour fluidifier le béton.

- Introduction d'un volume limite de granulats,  $V_{bi}$ , de taille  $d_i$ , volume au delà du quel Le béton ne s'écoule plus en milieu confiné.

### 1.5.3 Méthodes basées sur l'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. Reprenons la figure 4, en considérant maintenant 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 [12] 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. À l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

### 1.5.4 Méthode basée sur un plan d'expérience

Le principe de cette méthode est l'utilisation d'un plan d'expérience pour connaître l'effet des paramètres de composition du béton. Khayat et al [13] ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines  $E/(C+A)$ , la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur est varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions effectuées à 25. Au final, les modèles obtenus sont fournis avec les résultats des essais, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs.

### 1.5.5 L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE

Le principe de la méthode mortier de béton équivalent (MBE) est basé sur le fait qu'il existe une corrélation simple reliant les propriétés rhéologiques d'un béton au mortier qui le compose [14]. 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 et le nom donné au mortier qui participe à la rhéologie. Il peut être obtenu expérimentalement en tamisant le béton frais au tamis de 5mm. 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.

## 1.6 Principe et application des approches

### 1.6.1 Approche japonaise ou la méthode générale

Okamura et al, ont présenté une méthode simple de composition des BAP qui a pour objectif de faire un béton commun pour toutes les centrales à béton.

Avec cette méthode, les quantités de granulats fins et gros restent les mêmes, c'est la proportion eau/poudre et le dosage des adjuvants qui sont ajustés jusqu'à obtenir l'autoplaçabilité.

Cette méthode se base sur les paramètres suivants : [15]

- La quantité des gros granulats est fixe et le volume absolu est égal à 50% du volume solide. Pour des quantités supérieures à 50%, l'autoplaçabilité échoue souvent ;
- Le rapport eau/poudre, en volume, doit être compris entre 0,9 et 1, selon les propriétés de la poudre ;
- Le dosage en superplastifiant et le rapport final eau/poudre sont déterminés en fonction de la réalisation des mélanges expérimentaux et des essais d'autoplaçabilité préalables.

### 1.6.2 Approche suédoise (CBI)

Cette méthode est basée sur la méthode japonaise citée ci-dessus, le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation.

Pour chaque rapport G/S on estime le volume de pâte critique pour le blocage, on retiendra ensuite le rapport G /S qui vérifie les propriétés rhéologiques recherchées. [2]

Les dosages des fines, de l'eau et du superplastifiant sont ajustés pour avoir une viscosité suffisante et la résistance souhaitée.

Cette approche permet une meilleure optimisation du squelette granulaire. Cependant, on ne peut pas appliquer le critère de blocage à n'importe quel type de granulats.

### 1.6.3 Approche du laboratoire central des ponts et chaussées LCPC

Cette approche consiste à développer un modèle mathématique à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre différents constituants du mélange.

Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire et de prendre en compte l'effet de confinement des armatures sur la compacité du béton et donc sur son ouvrabilité.

La compacité du mélange est déterminée avec une précision inférieure à 1% à partir des caractéristiques des constituants suivantes :

- les distributions granulaires.
- les proportions du mélange.
- la compacité propre.
- la densité apparente.

Ce modèle est utilisé pour prévoir l'évolution de l'ouvrabilité des bétons en fonction de leur composition, il sert aussi à :

- Comprendre et évaluer l'influence des différents constituants sur les propriétés du béton.
- Choisir les matériaux qui permettent d'obtenir un béton avec de bonnes caractéristiques, que ce soit à l'état frais (ouvrabilité, stabilité) ou à l'état durci (résistance, retrait, fluage).
- Prendre en compte la spécificité et la nature d'un projet lors de la formulation du béton (béton pompé par exemple).

## 1.7 Caractérisation du BAP a l'état frais

### 1.7.1 Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet de contrainte appliquées, étant donné le taux d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation dans le temps [17]. Cette science intègre aussi l'étude des substances liquides ou solides en englobant de nombreuses disciplines fondamentales telles que la mécanique des fluides newtoniens, la plasticité, la résistance des matériaux, etc. Par cette science, il est possible d'établir des relations entre les contraintes, les déformations et le temps.

Le but de l'étude du comportement rhéologique d'un corps est d'estimer le système de forces nécessaire pour causer une déformation spécifique, ou la prévision des déformations causées par un système de force spécifique [18].

Il existe plusieurs modèles de comportement rhéologique qui peuvent s'appliquer aux corps fluides. La figure suivante présente des courbes de comportement pour les deux grandes familles de corps fluides. (Figure 1.5). Le comportement rhéologique de ces corps est illustré à partir de la relation taux de cisaillement-contrainte de cisaillement.

La première famille de comportement rhéologique comprend les corps exclusivement visqueux. Dans cette famille, on peut retrouver, entre autre, le corps Newtoniens. L'écoulement de ces corps se produit aussitôt qu'une contrainte est appliquée et le comportement est alors déterminé uniquement par la viscosité. La viscosité est une grandeur physique qui caractérise l'existence d'une résistance à l'écoulement [19].

La seconde famille de comportement rhéologique comprend le corps viscoplastique. Pour ces corps en plus de la viscosité, il faut vaincre une résistance supplémentaire avant que l'écoulement puisse s'amorcer. Il s'agit d'un seuil de plasticité aussi appelé seuil de cisaillement dans le cas de corps Binghamien (La courbe d'écoulement d'un corps Binghamien est une droite) [20].

Pour chacune des deux familles de comportement, il existe des modèles complémentaires pour lesquels la viscosité n'est pas constante mais dépendant du taux de cisaillement. Dans le cas où la contrainte de cisaillement augmente lorsque le taux de cisaillement augmente, il s'agit de corps épaississants ; si la contrainte de cisaillement diminue lorsque le taux de cisaillement augmente, il s'agit alors le corps fluidifiants.

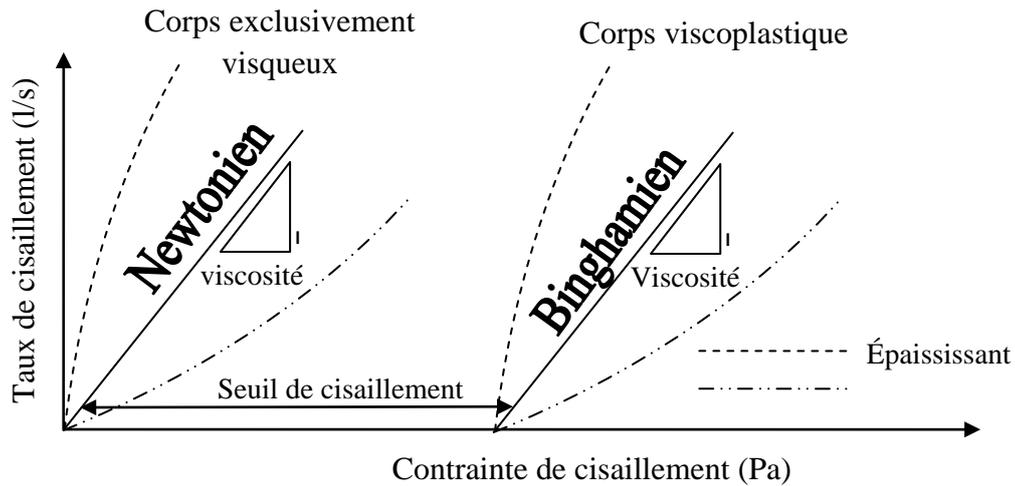


Figure 1.5 : courbe de comportement rhéologique pour les corps fluides [17].

### 1.7.2 Lois du comportement rhéologique des BAP

L'écoulement est différent d'un matériau à un autre selon la facilité et la vitesse avec laquelle il se produit: ces deux paramètres sont contrôlés par la cohésion et la plasticité de matériau, auxquelles on donne le nom de viscosité plastique.

Le comportement rhéologique dépend de cette viscosité plastique qui fait la différence entre les fluides et qu'on classe comme fluide Newtonien ou fluide non Newtonien.

#### a) Fluide Newtonien [21]

Le fluide Newtonien a un comportement visqueux parfait lorsque l'étalement survient aussitôt que l'on applique une contrainte de cisaillement. Cette viscosité reste constante et est indépendante du taux de cisaillement. Le modèle rhéologique de ce comportement est donné

Par la relation suivante :

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1.3)$$

Où :  $\tau$  = contrainte de cisaillement (Pa);  $\mu$  = viscosité plastique (Pa.s);  $\dot{\gamma}$  = taux de cisaillement ( $s^{-1}$ ).

La figure ci-dessous illustre le comportement d'un fluide newtonien. (Figure 1.6).

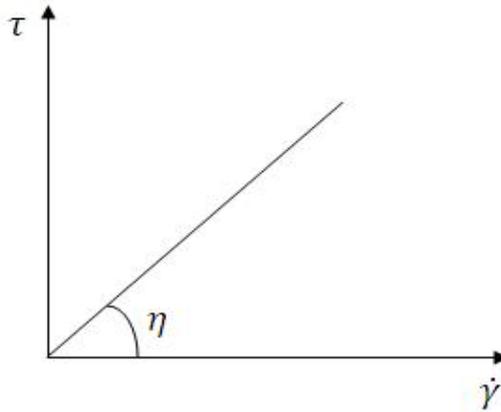


Figure 1.6 : Fluide newtonien.

b) Fluide non Newtonien [21]

Un fluide non newtonien est un fluide dont le taux de cisaillement est proportionnel à sa résistance au cisaillement mais dont la viscosité n'est pas constante et varie avec la variation de la contrainte de cisaillement. Différents modèles peuvent être utilisés pour décrire le comportement rhéologique des bétons. Dans la pratique, deux modèles sont couramment utilisés pour les BAP : le modèle de Bingham et le modèle de Herschel-Bulkley.

- Modèle de Bingham

Le modèle de Bingham est représenté par les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} & \text{si } \tau > \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \text{si } \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (1.4)$$

Où :  $\tau$  = Contrainte de cisaillement (Pa) ;  $\tau_0$  = Seuil de cisaillement (Pa) ;  $\dot{\gamma}$  = Gradient de vitesse ( $s^{-1}$ ),  $\mu$  = Une constante appelée la viscosité plastique de Bingham (Pa.s).

Ce modèle permet d'expliquer que le matériau se comporte comme un solide pour une contrainte de cisaillement  $\tau$  inférieure au seuil de cisaillement et qu'il se comporte comme un fluide newtonien pour une contrainte de cisaillement au-delà de la contrainte seuil. Ce comportement est présenté dans la figure ci-dessous : (figure 1.7)

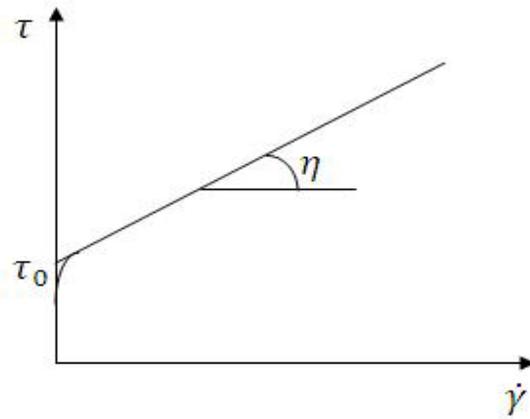


Figure 1.7 : Fluide de Bingham.

- Modèle de Herschel-Bulkley

Le modèle de Herschel-Bulkley est représenté par l'équation suivante :

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1.5)$$

Où :  $\tau$  = Contrainte de cisaillement (Pa) ;  $\tau_0$  = Seuil de cisaillement (Pa) ;  $k$  = est le coefficient de viscosité ;  $n$  = est l'indice de viscosité,  $\dot{\gamma}$  = Gradient de vitesse ( $s^{-1}$ ).

Ce modèle (figure 1.8) a été élaboré dans le but d'éviter d'avoir un seuil de cisaillement négatif, son comportement diffère selon la valeur de  $n$  qu'on retrouve ci-dessous :

- $n = 1$ , le fluide est Binghamien.
- $n > 1$ , le fluide a un comportement rhéoépaississant (dilatants).
- $n < 1$ , le fluide est rhéofluidifiant.

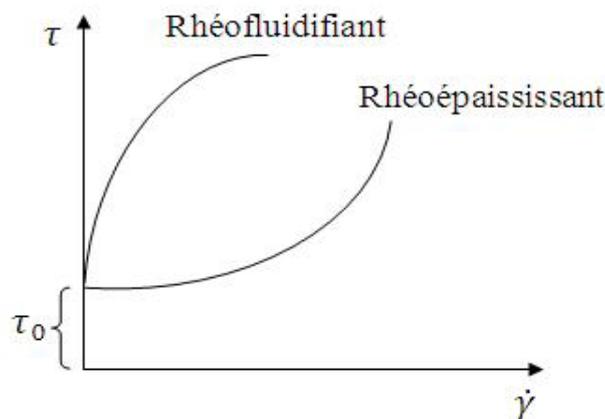


Figure 1.8 : Modèle de Herschel-Bulkley.

Finalement, les différents types de béton tels que, les bétons autoplaçant (BAP), les bétons à haute performance (BHP) et les bétons vibres, peuvent avoir différents types de comportements rhéologiques (figure 1.9). Le seuil d'écoulement des BAP est plus faible que celui des autres bétons [22].

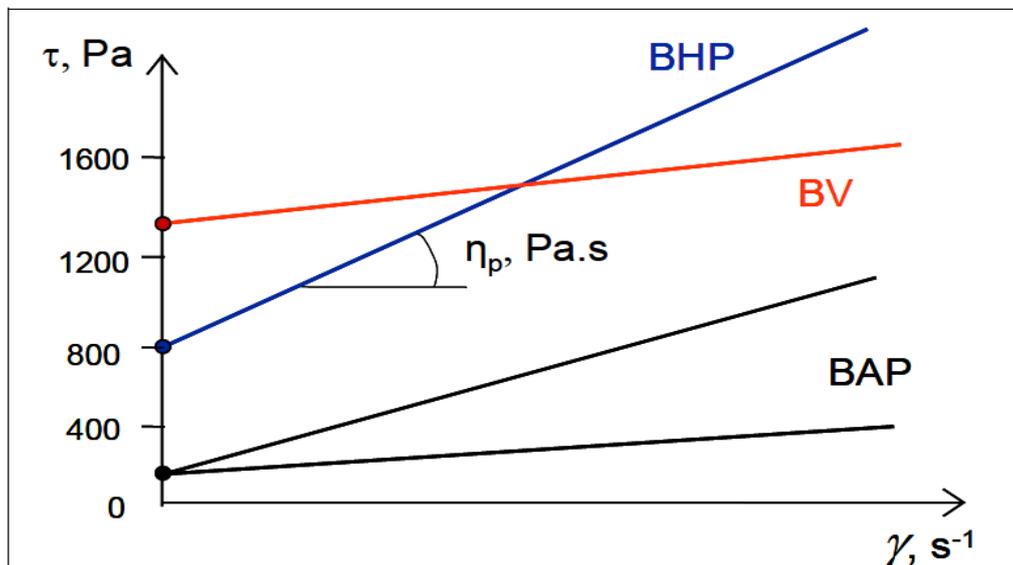


Figure 1.9 : Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton [23].

## 1.8 Propriétés des BAP a l'état durci

### 1.8.1 Résistance a la compression

L'évolution des résistances à la compression des BAP semble être voisine de celle des bétons ordinaires en raison de l'utilisation fréquente de fillers calcaires connus pour avoir un effet accélérateur sur l'hydratation des silicates de calcium. Aux très jeunes âges, les résistances des BAP peuvent être affectées lorsque ces bétons contiennent des quantités importantes de superplastifiants, un dosage trop élevé pouvant conduire à un retard de prise considérable.

Il est possible cependant d'atteindre des résistances mécaniques élevées au démoulage en optimisant le choix et le dosage en adjuvants. (Figure 1.10).

En fonction des propriétés pouzzolaniques des additions, les résistances mécaniques des BAP peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours. (Figure 1.11).

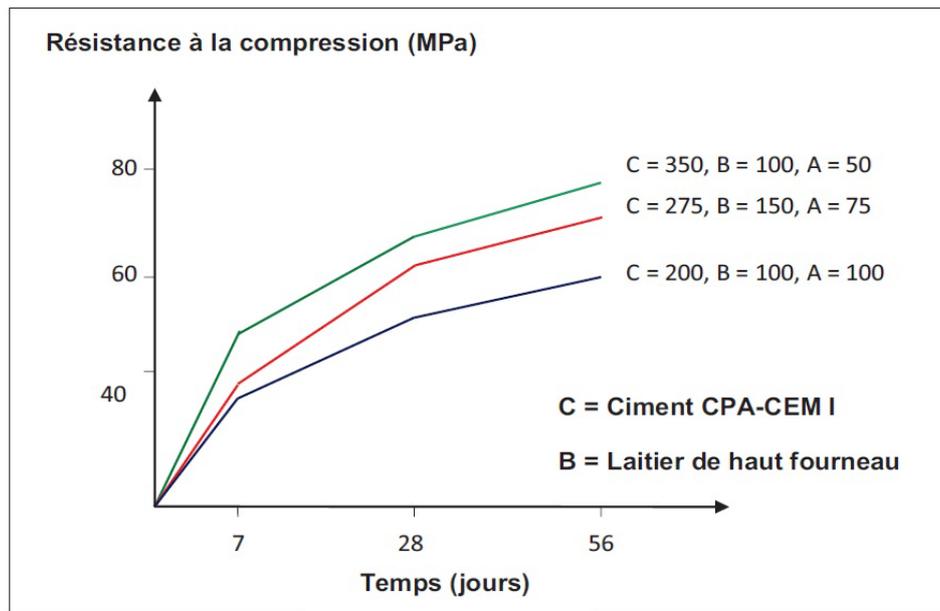


Figure 1.10 : Variation des résistances mécaniques en compression de BAP en fonction de la composition du liant [3].

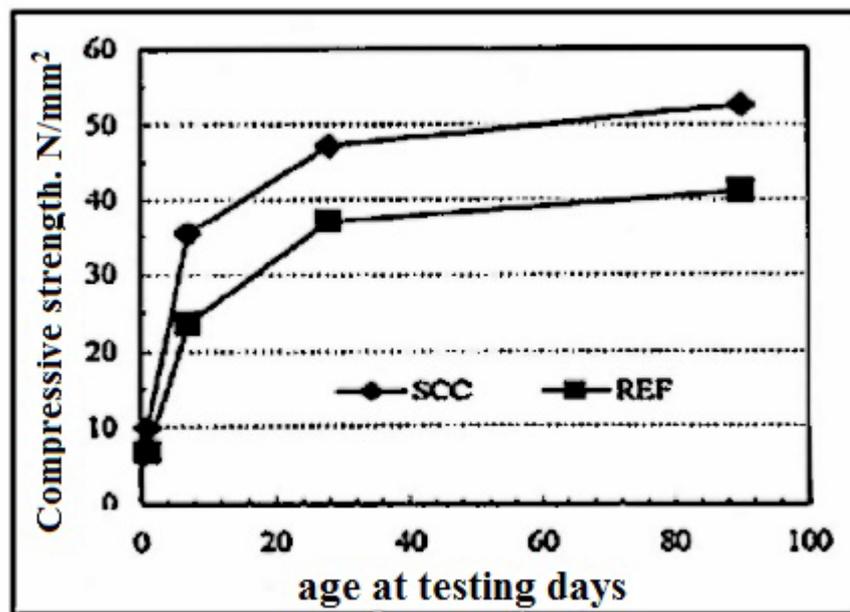


Figure 1.11 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant [25].

### 1.8.2 Résistance à la traction

La particularité des BAP peut entraîner des variations de résistance. Par exemple, la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer la résistance en traction [26]. Ils montrent que l'augmentation de la quantité de sable ou/et volume de fines entraîne une élévation de la résistance en traction.

En effet, la résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. On peut noter que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont fréquemment utilisés dans la littérature pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus.

Pour certains auteurs [26], [27], la porosité de l'auréole de transition des BAP est inférieure à celle des BV. Donc, la résistance en traction des BAP est supérieure à celle des BV (de l'ordre de 10%). Ces résultats sont repris par Pinaud [28]. Il suggère que la qualité de l'interface pâte-granulats est meilleure dans les BAP et la faible proportion de granulats diminue le risque de propagation des premières fissures.

### 1.8.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité dépend à la fois des proportions et des modules des différentes phases constituant un béton. Or, un BAP est composé d'un volume de pâte important et de ratio G/S plus faible qu'un BV.

D'après différents codes (Eurocode ou DTU), le module d'élasticité est fonction de la résistance en compression des bétons. Donc, à résistance égale, un BAP devrait avoir le même module qu'un béton vibré. Or, Persson [29] et Pons et al [30] ont montré que le module est similaire pour les BAP et les BV (figure 1.12). De même, König et al [26] constatent que les modules des BAP sont très proches de ceux des BV. D'autres auteurs indiquent un module plus faible que ceux des bétons vibrés [27], [28], [31].

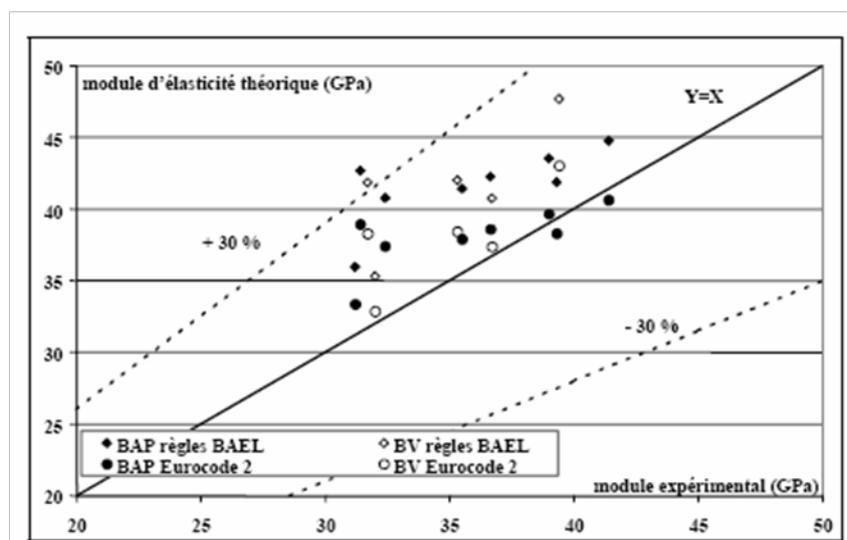


Figure 1.12 : Comparaison des modules d'élasticité d'après les codes de construction de BAP et de béton vibrés avec leurs valeurs expérimentales [30].

Comme pour la résistance à la compression, d'autres paramètres influencent le module d'élasticité. Turcry et al [32] montrent 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. En effet, Pineaud [28] observe des valeurs de déformations à la rupture très proches pour les BAP et les BV. Parallèlement au volume de pâte, il est observé une diminution du module avec l'augmentation du rapport E/L (résultat en accord avec la diminution de la résistance en compression et la diminution de la compacité de la matrice) [28].

#### 1.8.4 Retrait

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, il correspond à des variations dimensionnelles mettent en jeu des phénomènes physique avant, pendant ou après la prise des bétons.ces variations donnent lieu à l'apparition de fissures dans le béton.

Plusieurs type de retrait existe dé la fabrication du béton jusqu'à maturité on notera :

##### 1.8.4.1 Retrait thermique

La réaction d'hydratation peut devenir fortement exothermique et provoquer de forts gradients de température. Au cœur d'éléments massifs de structure, la température peut atteindre 50 à 70°C.par conséquent, des retraits différentiels d'origine thermique vont s'ajouter pour obtenir l'équilibre de l'élément avec les températures du milieu environnant. La durée de la relation d'hydratation est relativement courte puisque 60% de l'hydratation (en rapport avec la quantité de ciment qui pourra réellement être hydratée de l'ordre de 60 à 70% du volume de ciment) est obtenue au bout d'un jour et, 90% au bout de 4 à 5 jours, par conséquent le retrait thermique est effectif à très court terme. [33]

##### 1.8.4.2 Retrait endogène

En ce qui concerne le retrait endogène, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés. En effet, même si certains auteurs [16] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés voir (figure 1.13), d'autres contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton.

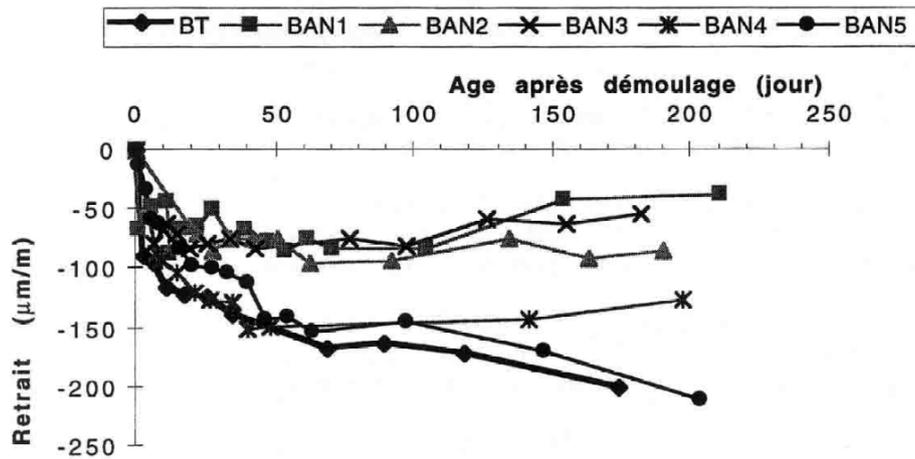


Figure 1.13 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP [16].

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés.

#### 1.8.4.3 Retrait plastique

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 [33].

Pour les déformations au jeune âge, autrement dit le retrait plastique, plusieurs travaux se sont attachés à les expliciter en étudiant notamment les différences potentielles de comportement entre BAP et béton vibré. Les premiers auteurs observent des retraits plastiques deux à trois fois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés voir (figure 1.14). Pour Turcry [11] (figure 1.15), l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons vibrés.

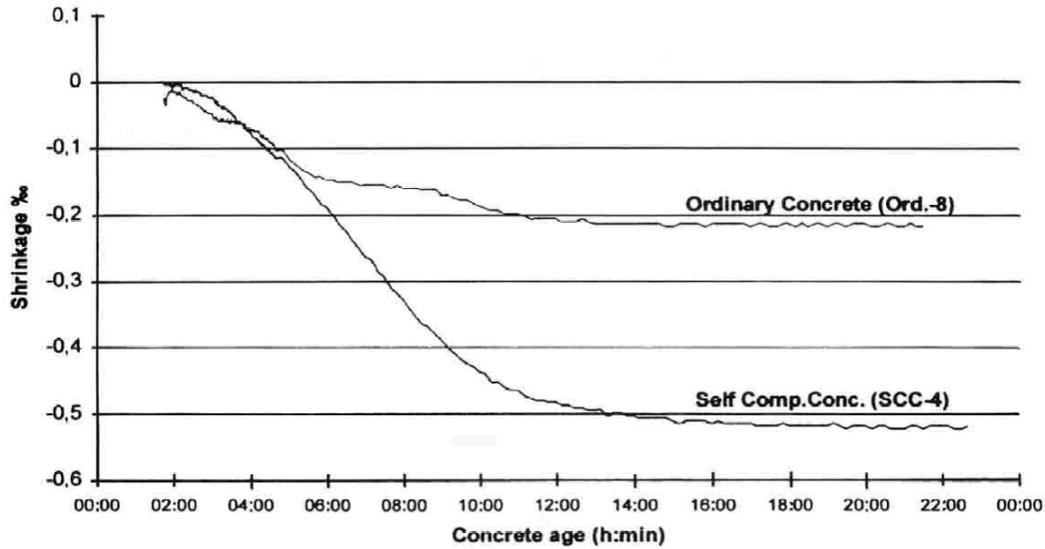


Figure 1.14 : Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure (T = 20°C, 50% HR).

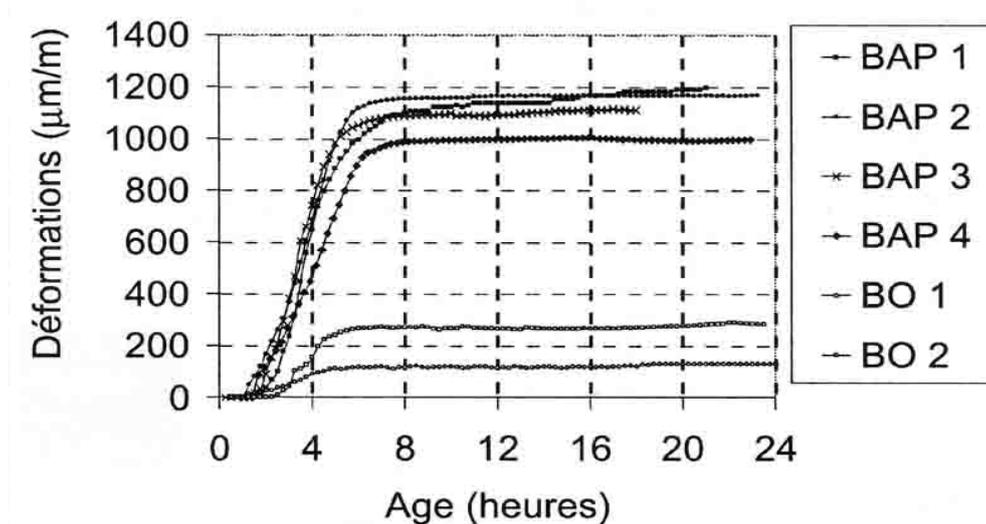


Figure 1.15 : Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés dérivés.

#### 1.8.4.4 Retrait de séchage (dessiccation)

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés voir (figure 1.16). Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé.

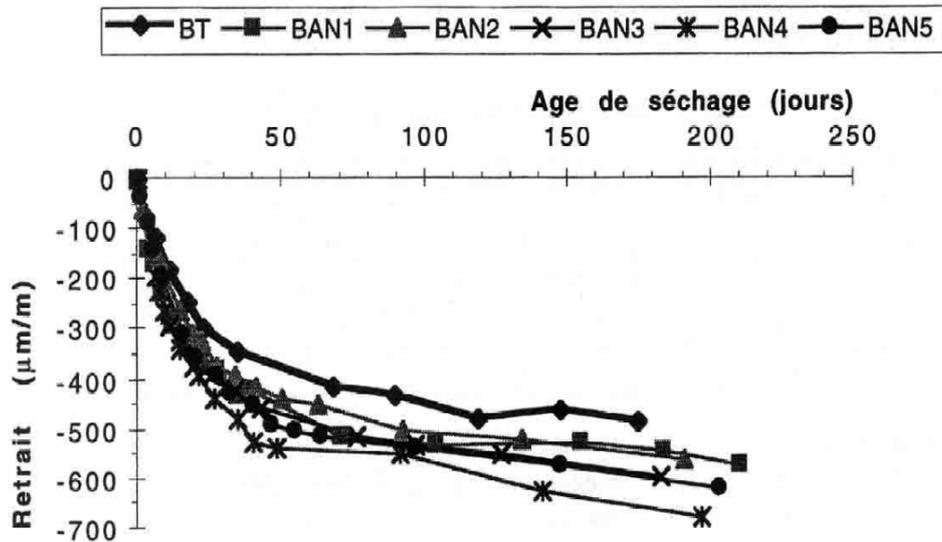


Figure 1.16 : Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP [35].

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700  $\mu\text{m/m}$  (à 180 jours).

Enfin, d'autres auteurs observent des retraits de séchage des BAP moins importants voir (figure 1.17) que ceux des bétons vibrés auxquels ils sont comparés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent), augmenter le volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage.

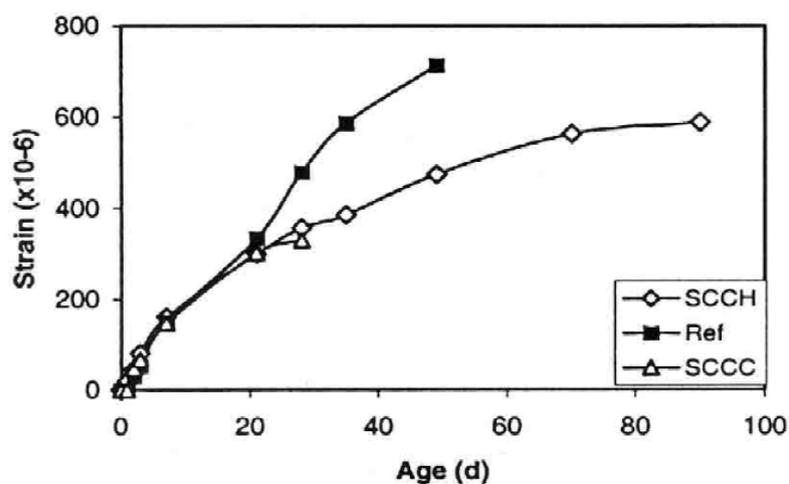


Figure 1.17 : Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant.

Comme expliqué précédemment, le retrait de dessiccation provient de l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du béton vers le milieu extérieur. Le dessèchement est d'autant plus fort que la quantité d'eau initiale dans le matériau est grande et les tensions créées par cette perte en eau s'amplifient également [34].

### 1.8.5 Déformations sous charge (fluage)

Lorsque la charge est appliquée pendant un certain temps, la "viscosité" du béton intervient et la déformation résultante augmente graduellement avec le temps. Il y a fluage du béton qui se comporte alors comme un corps élasto-visco-plastique. Les déformations de fluage ne sont pas des grandeurs directement mesurables et nécessitent la connaissance des déformations sous charge et de retrait pour être déterminées.

L'intensité de ces déformations est influencée par différents paramètres. Certains facteurs sont relatifs aux propriétés intrinsèques du béton (constituants), d'autres viennent des conditions extérieures. Le composant d'un tel matériau hétérogène qui subit le fluage est bien entendu la pâte de ciment. Le dosage en eau d'une formulation de béton est donc un paramètre important. Plus celui-ci sera élevé, plus le fluage sera important. Les granulats ont quant à eux pour rôle de gêner les déformations. Cette limitation dépend de la nature, de la taille et de la répartition des granulats mais elle est d'autant plus forte que leur module d'élasticité est grand.

D'autres facteurs ont une grande influence sur le fluage du béton. Le premier concerne le temps de chargement : les déformations sous charge constante sont rapides pendant les premières heures puis suivent une loi en logarithme du temps par la suite. Un deuxième facteur important est l'humidité relative de l'air ambiant dans lequel est conservé le béton. Pour un béton donné, plus l'humidité relative est basse, plus le fluage est important (figure 1.18).

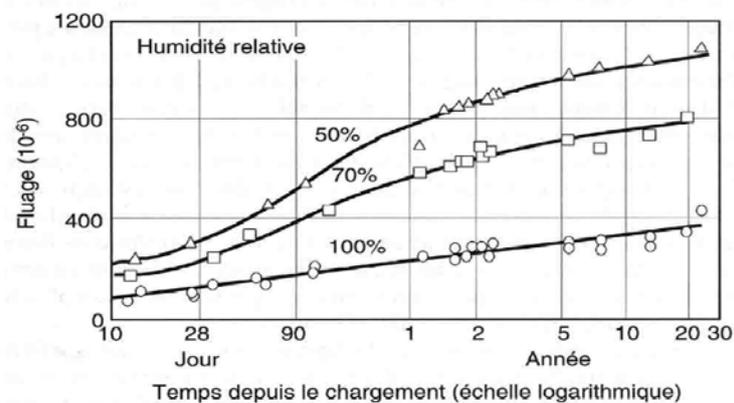


Figure 1.18 : Fluage de bétons chargés à 28 jours et conservés à différents degrés d'humidité relative [36].

Enfin, la température, le taux de chargement (déformations proportionnelles à la charge appliquée), l'âge du béton au moment du chargement et la résistance du béton influent sur l'intensité du fluage. Ainsi, l'intensité du fluage varie de manière inverse à l'âge de son chargement, elle diminue avec l'augmentation de la résistance du béton au moment de la mise en charge et elle augmente avec le rapport surface/volume de l'élément étudié.

## 1.9 La durabilité

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...), c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétique. Il doit satisfaire, sans perdre ses performances, aux besoins des utilisateurs au cours du temps.

### 1.9.1 Perméabilité au gaz

Les transferts de matière à travers le béton sont de même nature que ceux relatifs à d'autres milieux poreux et peuvent être étudiés à l'aide de différents fluides. Dans le cas de la perméabilité, les principaux fluides sont l'eau et le gaz.

Les spécificités de composition des BAP ne semblent pas permettre de tirer un premier commentaire quant à une perméabilité différente de celle des bétons vibrés. Le volume de pâte plus important peut a priori être un handicap pour ces bétons mais l'utilisation d'addition minérale est susceptible d'améliorer cette propriété : la densification de la matrice cimentaire qu'elle engendre peut éventuellement diminuer la perméabilité du béton.

Certaines études [37] publiées ont en effet montré que les additions minérales telles que le filler calcaire, donnent aux BAP une microstructure plus dense que les bétons vibrés de même rapport E/C. La porosité de ces BAP, en particulier celle de l'auréole de transition, est significativement plus faible que celle des bétons vibrés. D'après ces données, il résulte de ces observations une amélioration des propriétés de transfert mesurées, comme la perméabilité aux gaz par exemple, et une meilleure durabilité de ces bétons.

D'autres résultats relatifs à la durabilité des BAP [38] montrent que leur perméabilité à l'oxygène est moindre que celle des bétons vibrés voir (figure 1.19). Les compositions étudiées ont des caractéristiques très proches (quantité de ciment, rapport E/C) et il ressort de ces observations que la diminution de la perméabilité est principalement due à l'utilisation

d'additions minérales dans les BAP. L'influence d'autres paramètres distinguant les BAP des bétons vibrés n'a pas clairement été élucidée. Le volume de pâte, par exemple, n'entre pas dans les éléments de comparaison de la perméabilité de deux types de béton.

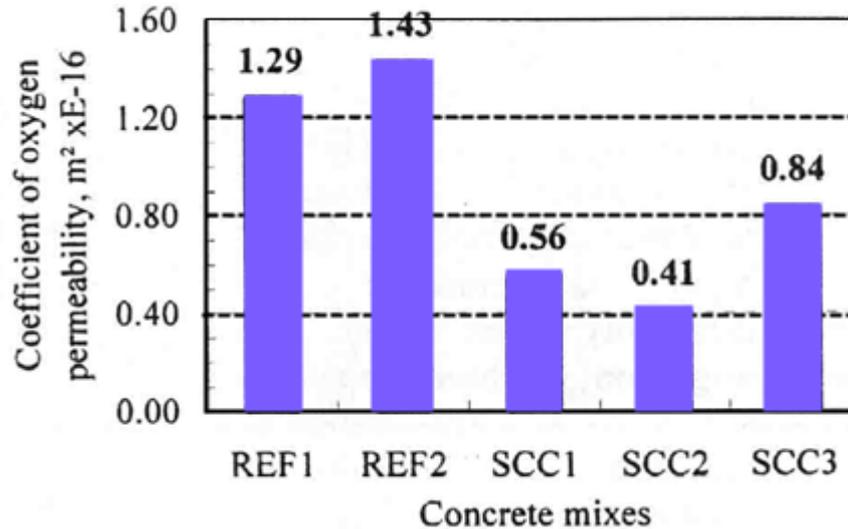


Figure 1.19 : Coefficient de perméabilité à l'oxygène de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés correspondants [38].

### 1.9.2 Diffusion des ions chlore

La diffusion est le résultat d'un transfert de matière, à travers le béton, dû à un gradient de concentration (diffusion moléculaire). L'attaque du béton par les chlorures entraîne en effet la destruction de la couche de passivation des aciers et la corrosion de ces derniers en présence d'eau et d'oxygène peut alors avoir lieu. Ces ions chlore peuvent provenir du béton lui-même (granulats, eau de gâchage) mais l'existence de normes limitatives à cet égard conduit à s'intéresser aux chlorures venant du milieu extérieur (eau de mer, sels fondants) [34].

Certains auteurs [45] ont évalué le comportement des bétons autoplaçants et des bétons vibrés soumis à un essai de migration des ions chlorures sous un champ électrique. Malgré un rapport E/C plus faible (0,4 contre 0,5 pour le béton vibré), le BAP s'est avéré moins résistant à la migration des ions chlore. Les coefficients de diffusion du BAP, calculés à partir de ces essais, sont 2 à 3 fois supérieurs à ceux du béton vibré ( $31$  à  $56 \cdot 10^{-12}$   $m^2/s$  au lieu de  $15$  à  $18 \cdot 10^{-12}$   $m^2/s$ , voir (figure 1.20). Selon ces auteurs, ces faibles performances pourraient être attribuées à une mauvaise dispersion de l'addition calcaire.

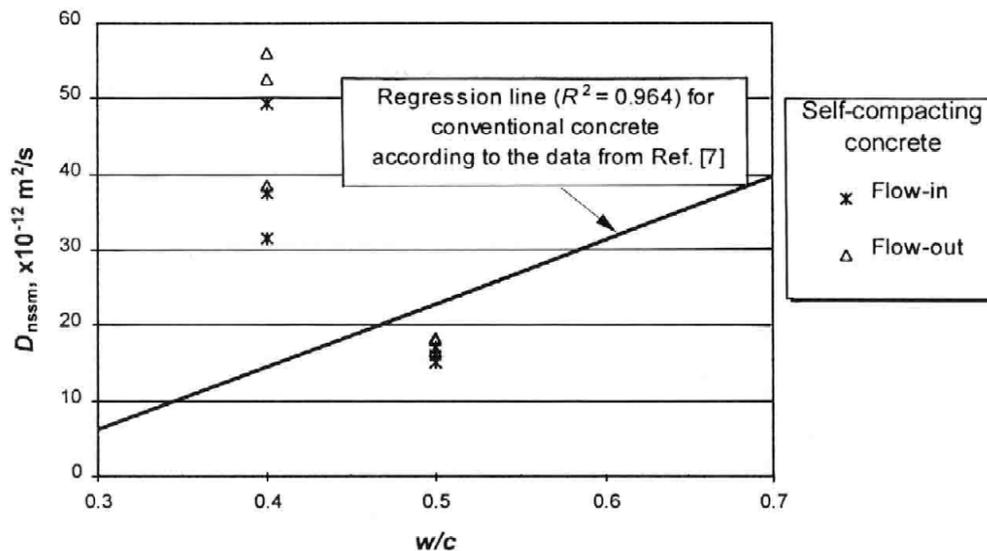


Figure 1.20 : Comparaison des coefficients de diffusion des ions chlore entre BAP et bétons vibrés [45].

D'autres auteurs [46] observent expérimentalement que les BAP possèdent des coefficients de diffusion des ions chlore équivalents, sinon meilleurs que les bétons vibrés.

D'après Zhu et bartos [44], la résistance à la pénétration des ions chlore est très influencée par le type d'addition minérale employé dans le béton. Les bétons formulés avec (BAP SCC1) ou sans filler calcaire (BAP SCC3 et béton vibré REF1) présentent des coefficients de migration des ions chlore similaires, avec une valeur légèrement plus faible pour celui formulé avec un filler calcaire voir (figure 1.21). Ces auteurs indiquent également que l'emploi de cendres volantes diminue considérablement le coefficient de migration de ces bétons.

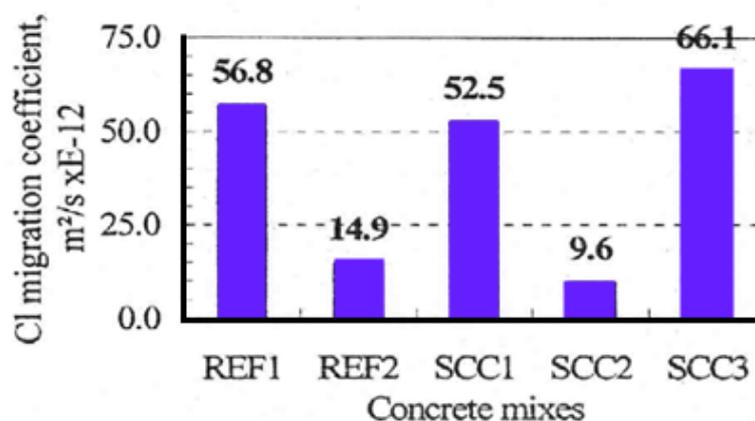


Figure 1.21 : Coefficient de migration des ions chlore de trois BAP (SCC) et de deux bétons vibrés correspondants [44].

Toutefois, les résultats indiquant des comportements équivalents des BAP et des bétons vibrés vis-à-vis du mécanisme de diffusion sont les plus courants (figure 1.22). [47]

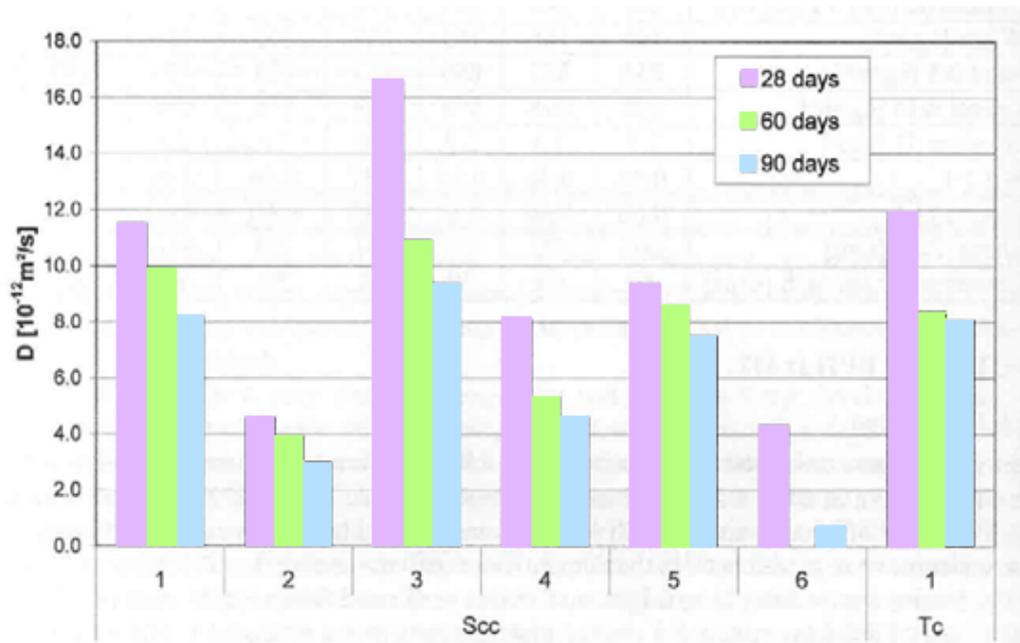


Figure 1.22 : Coefficients de diffusion de BAP (SCC) et de bétons vibrés (TC) [47].

### 1.9.3 Absorption capillaire

Le transfert de liquides dans un matériau poreux dû à des tensions de surface dans les capillaires est appelé l'absorption d'eau [34]. Ce mécanisme de transfert n'est pas seulement lié à la structure poreuse mais aussi à l'humidité relative du béton.

La formulation particulière des BAP (volume de pâte plus important, additions minérales) pourrait les entraîner à posséder une absorption d'eau différente de celles des bétons vibrés.

Le tableau suivant (tableau 1.1) [43] dément cette hypothèse. En effet, l'absorption par immersion et par capillarité des BAP est analogue à celle des bétons vibrés correspondants (SCC1 et TC1). Ces deux grandeurs augmentent avec le rapport E/C (SCC4 a un rapport E/C de 0,36 et SCC2-SCC7 de 0,55) par suite de l'augmentation du nombre de pores et de leur taille. L'influence du filler calcaire est bénéfique pour l'absorption capillaire et néanmoins néfaste pour l'absorption par immersion (SCC5 et SCC7).

Mix	Absorption by immersion	Capillary suction after 24 hours	
	(% of dry mass)	Mass increase (g)	Height (mm)
SCC1	4.8	37	25
SCC2	5.0	49	31
SCC3	4.7	23	18
SCC4	4.2	19	17
SCC5	5.1	33	23
SCC6	4.1	25	21
SCC7	6.1	26	29
TC1	4.9	43	44

Tableau 1.1 : Absorption d'eau par immersion et par capillarité de sept BAP (SCC) et d'un béton vibré (TC) [43].

Cependant, d'autres résultats [44] démontrent que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés (figure 1.23) et elle est d'autant plus faible qu'ils contiennent des fillers calcaires ou des cendres volantes.

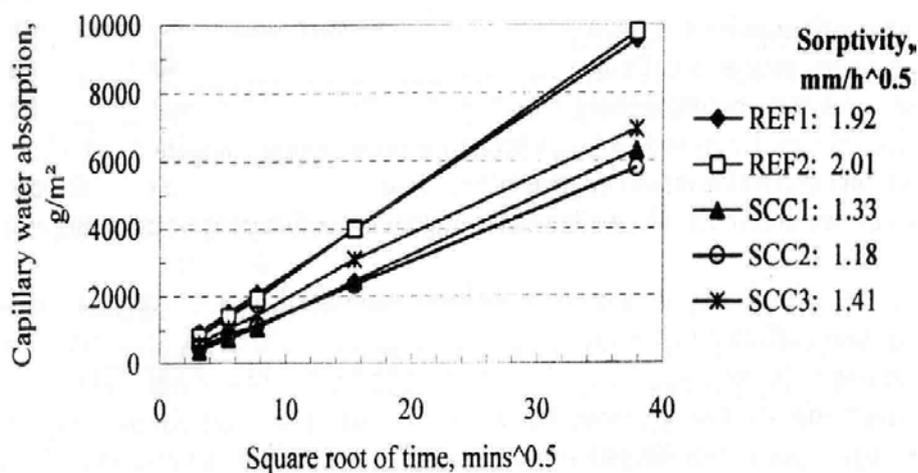


Figure 1.23 : Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés [44].

#### 1.9.4 Carbonatation

Bien que généralement supposé inerte vis-à-vis du béton, l'air ambiant contient du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> qui peut réagir avec le ciment hydraté pour former des carbonates de calcium

CaCO<sub>3</sub> 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 [36].

Parmi les facteurs influençant la carbonatation et sa vitesse de propagation, certains sont d'ordre intrinsèque au béton et d'autres relatifs aux conditions environnementales. Citons par ordre d'importance, le rapport E/C (lié à la microstructure et au réseau poreux), la teneur en CO<sub>2</sub>, le taux d'humidité et la température.

Les premiers résultats faisant état d'une comparaison entre BAP et bétons vibrés indiquent qu'il semble ne pas y avoir de différence notable entre leurs cinétiques de carbonatation (figure 1.24). [41]

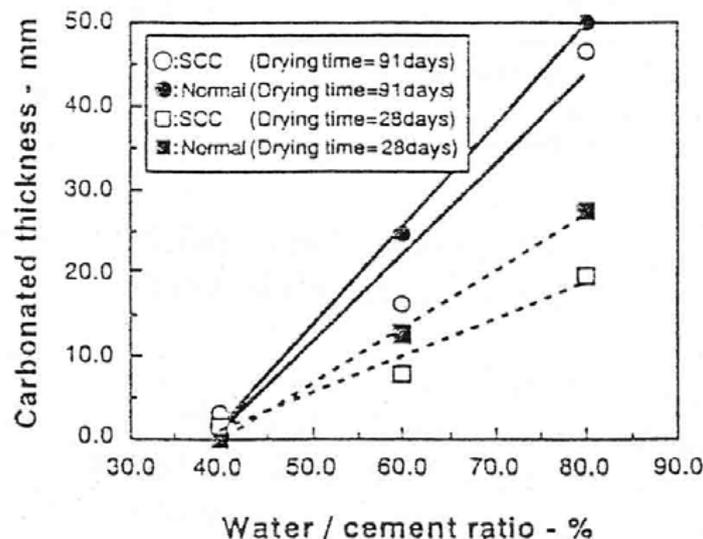


Figure 1.24 : Profondeur de carbonatation des BAP (SCC) et des bétons vibrés de même rapport E/C [41].

D'autres résultats [42] conduisent à des conclusions similaires (tableau 1.2). L'augmentation de la quantité de ciment, qui implique un rapport E/C plus faible et une résistance mécanique plus élevée, conduit à une profondeur de carbonatation plus faible (SCC4, SCC5 et SCC6 contiennent respectivement 300, 400 et 450 kg/m<sup>3</sup> de ciment). L'addition de filler n'a pas une influence claire sur la profondeur de carbonatation (SCC1 et SCC7 possèdent des quantités identiques de ciment et de filler, mais ce dernier est de type différent). Enfin, toutes compositions confondues, les BAP ont un comportement identique à celui des bétons vibrés.

	Treatment A	Treatment B
SCC1	21.3	5.3
SCC2	23.4	5.4
SCC3	18.4	4.1
SCC4	43.8	20.2
SCC5	16.9	11.6
SCC6	16.0	10.0
SCC7	20.6	9.5
TC1	16.1	6.2
TC2	5.0	7.1

Tableau 1.2 : Valeurs expérimentales du coefficient K, en  $\text{mm.an}^{1/2}$ , pour deux expositions différentes [42].

#### 1.9.5 Attaques sulfatiques externes

Les origines des sulfates peuvent être très variées : eaux et sols riches en gypse, sulfates issus de produits industriels, d'engrais ou de substances organiques, sulfates de l'eau de mer, etc. Les normes sur la composition du béton considèrent de tels environnements comme chimiquement agressifs – classes d'exposition XA dans la norme EN 206-1 – et des précautions doivent alors être prises en ce qui concerne le choix du ciment et la formulation du béton. Les conséquences de la pénétration des sulfates dans le béton sont la formation de gypse, d'ettringite, ou de thaumasite, et la transformation des produits d'hydratation. Cela peut entraîner un gonflement, une perte de résistance et une altération de la surface de l'élément en béton. Si le premier des trois phénomènes est le plus connu et caractéristique, les deux autres ne sont pas à négliger dans la pratique. Si l'ion sulfate  $\text{SO}_4^{2-}$  est toujours en cause, les conditions dans lesquelles il agit, notamment le cation associé, la température, le pH, la concentration, conditionnent fortement le mécanisme et le type de dégradation. En outre, pour le même processus et le même stade de dégradation, le taux d'atteinte varie en fonction de l'indicateur mesuré. Dans ces conditions, il devient délicat de définir un test représentatif, un indicateur fiable et un critère pertinent, pour évaluer ou garantir la résistance d'un liant ou d'un béton aux sulfates.

Bertil persson [29] a étudié la résistance des BAP et BV conservé dans une solution de sulfate de sodium 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.

#### 1.9.6 Les cycles de gel-dégel

Des études comparatives entre BAP et béton vibré se sont intéressées à d'autres mécanismes liés à la durabilité des bétons, comme la détérioration par le gel. Ce sont plus particulièrement les cycles de gel-dégel qui 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 [34].

Yazici [40] à étudié l'influence de la substitution du ciment par les cendres volantes (de 30 à 60%) et/ou la fumé 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 le fumé de silice (HS) a dépassée celle du BAP témoin (H) (figure 1.25). Cependant, l'augmentation du dosage des cendres volantes à plus de 30% diminue la résistance résiduelle en traction des BAP avec cendre volante seule (figure 1.26).

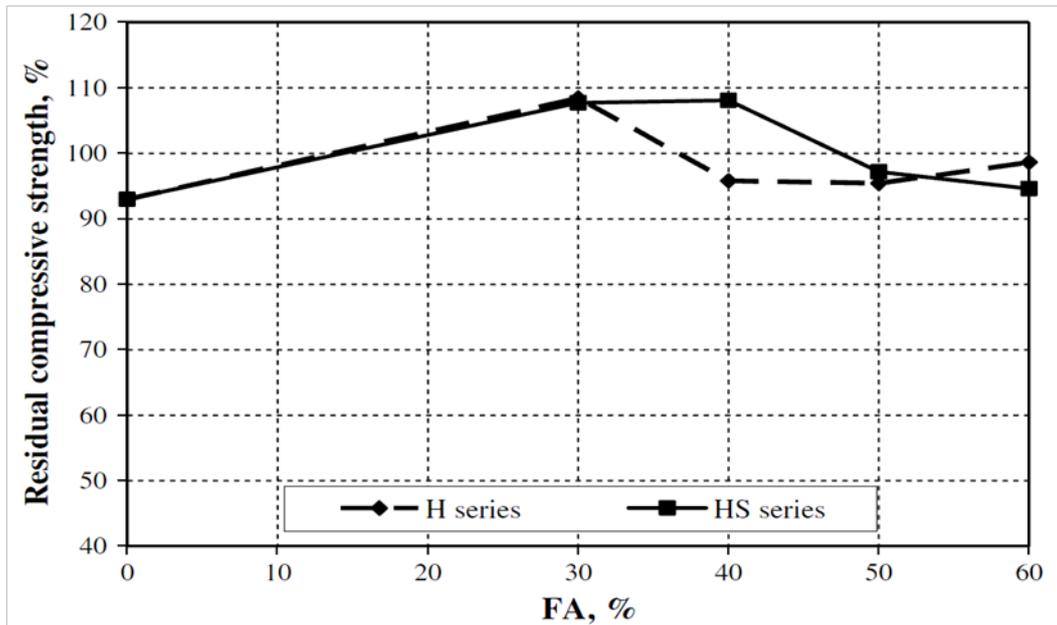


Figure 1.25 : Résistance résiduelle en compression après 90 cycles de gel-dégel [40].

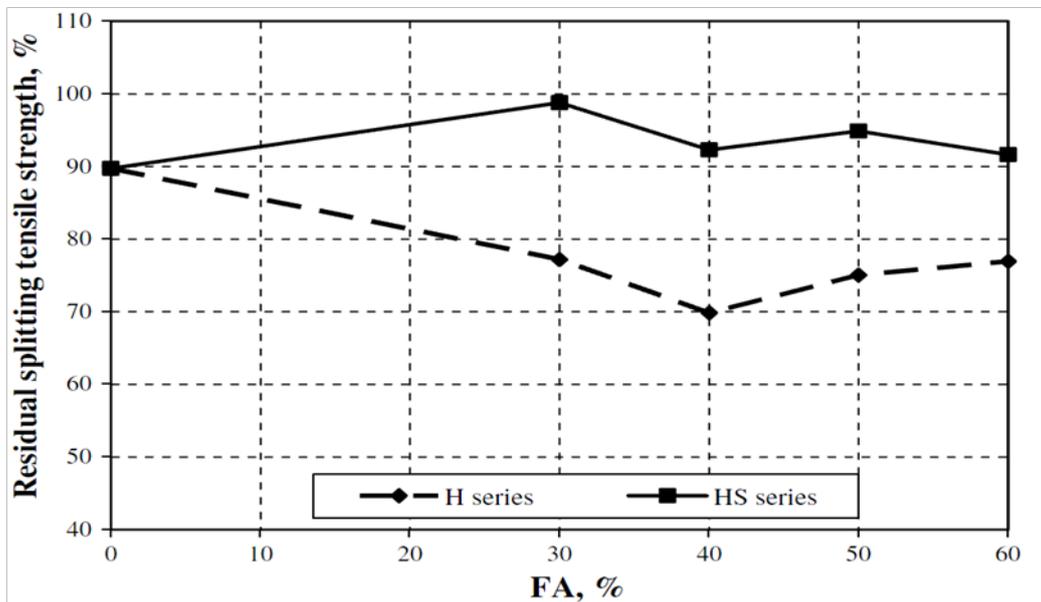


Figure 1.26 : Résistance résiduelle en traction après 90 cycles de gel-dégel [40].

### 1.10 Conclusion

La synthèse bibliographique nous a donnée une idée générale sur le BAP, on sait maintenant que les BAP sont des bétons très fluide se mettent en place sont vibration, mais pour avoir deux propriété contradictoire tel que la fluidité et la stabilité en même temps serais délicat, pour cela leurs formulations serais complexe. Pour avoir cette grande fluidité on utilisera un superplastifiant, l'excès de ce dernier peut provoquer une ségrégation, quoi que l'utilisation des agents de viscosité ou bien une grande quantité d'ajouts minéraux puisse contrarier ce phénomène.

D'après les travaux de recherche effectuée sur le BAP on peut dire que l'utilisation des ajouts minéraux améliore les caractéristiques du BAP à l'état frais et durci.

Il est claire que les travaux effectué sur des BAP a la pouzzolane naturelle sont peu, nous nous somme alors intéressés a étudier l'effet de la PZN sur les BAP a l'état frais et durci, pour valorisé l'utilisation de la PZN comme substitution au ciment dans la formulation des BAP suivant la méthode japonaise modifier par Domone, cette méthode a été utilisé vu sa simplicité dans la détermination des quantités des constituants du BAP.

## **CHAPITRE 2**

### **MATERIAUX ET ESSAIS**

## CHAPITRE 2

### MATERIAUX ET ESSAIS

#### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre on présentera le programme expérimental. On les méthodes d'essais réalisé ainsi que les différents matériaux utilisés.

#### 2.2 Caractérisation des matériaux

##### 2.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé est du type CPJ-CEM II/A 42.5 R provenant de la cimenterie de CIBA-LAFARGE à M'sila en Algérie. Ce ciment est un ciment Portland composé de 90% de clincker et de 10% de calcaire, sa résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa.

Les essais physiques et mécaniques du ciment ont été réalisés au laboratoire Géomatériaux et Génie Civil de l'Université de Blida, les résultats obtenus sont présenté dans le tableau (2.1).

Essais	CPJ-CEM II/A 42.5 R	
Masse volumique apparente ( $\rho_{app}$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	990	
Masse volumique absolue ( $\rho_{abs}$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	3040	
Finesse SSB ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	4300	
Temps de début de prise (heure, minute)	2h40	
Temps de fin de prise (heure, minute)	3h40	
Résistance à la compression (MPa)	2 jours	15.43
	7 jours	33.98
	28 jours	45.30

Tableau 2.1 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.

### 2.2.2 La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle est d'origine volcanique extraite du gisement volcanique situé à Beni-Saf. Cette pouzzolane est fournie sous forme de roches concassées de type pierre ponce et scorie (figure 2.1).



Figure 2.1 : Scories de la pouzzolane naturelle [(a) avant broyage, (b) après broyage].

Avant son utilisation on a procédé à son étuvage à 50°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter le broyage, dans notre cas on a utilisé un broyeur à boulets figure (2.2) d'une capacité de 5kg (laboratoire de chimie industrielle à Blida), pour des généralités sur le broyage voir (annexe A). La figure (2.3) présente la finesse de la pouzzolane en fonction du temps du broyage d'où on a déduit le temps nécessaire pour avoir la finesse de 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$  (celle visée dans notre travail) et qui est 41 minutes. [48]

Les caractéristiques physiques de la pouzzolane sont :

- La masse volumique apparente est de 1080  $\text{kg}/\text{m}^3$ .
- La masse volumique absolue est de 2879  $\text{kg}/\text{m}^3$ .



Figure 2.2 : Broyeur a boulets

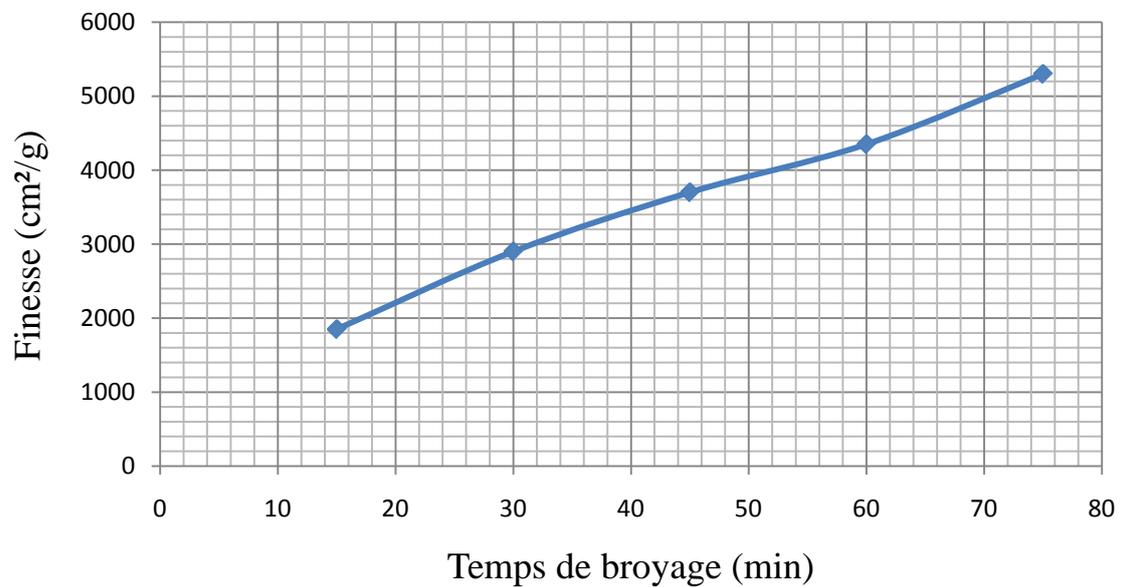


Figure 2.3 : Variation de la finesse de la pouzzolane en fonction du temps de broyage. [48]

### 2.2.3 Les granulats

#### 2.2.3.1 Le sable

Deux types de sable sont utilisés dans cette étude :

Sable de Baghlia (wilaya de Boumerdes), un sable roulé de forme arrondies, et le sable de Bougezoul (wilaya de Medea), un sable fin.

Nous avons mélangé les deux sables pour obtenir un mélange de module de finesse entre 2.2 et 2.8, les caractéristiques des deux sables sont présentées dans le tableau (2.2), ainsi que les courbes granulométrique sont données par la figure (2.4).

Granulat	Sable		
Classe granulaire (mm)	0/3	0/5	Mélange
Masse volumique apparente ( $\rho_{app}$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	1410	1619	1531
Masse volumique absolue ( $\rho_{abs}$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	2500	2563	2584
Coefficient d'absorption $A_b$ (%)	0,56	0,69	0,64
Humidité $\mu_s$ (%)	1,14	2,23	2,07
Module de finesse	1,68	3,1	2,5
Composition (%)	42,25	57,75	100
Equivalent de sable visuel (%)	70,65	86,20	80,15
Equivalent de sable au piston(%)	67,63	82,27	77,08

Tableau 2.2 : Caractéristiques des sables.

### 2.2.3.2 Le gravier

Le gravier utilisé est de deux classes granulaires différentes (3/8 et 8/15) provenant de Sétif.les principales caractéristiques physiques de gravier sont données dans le tableau (2.3).ainsi que les courbes granulométriques sont présenté par la figure (2.4).

Granulat	Gravier	
Classe granulaire (mm)	3/8	8/15
Masse volumique apparente ( $\rho_{app}$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	1486	1486
Masse volumique absolue ( $\rho_{abs}$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	2705	2705
Coefficient d'absorption $A_b$ (%)	0,58	0,58
Humidité $\mu_s$ (%)	0,23	0,38

Tableau 2.3 : Caractéristiques de gravier.

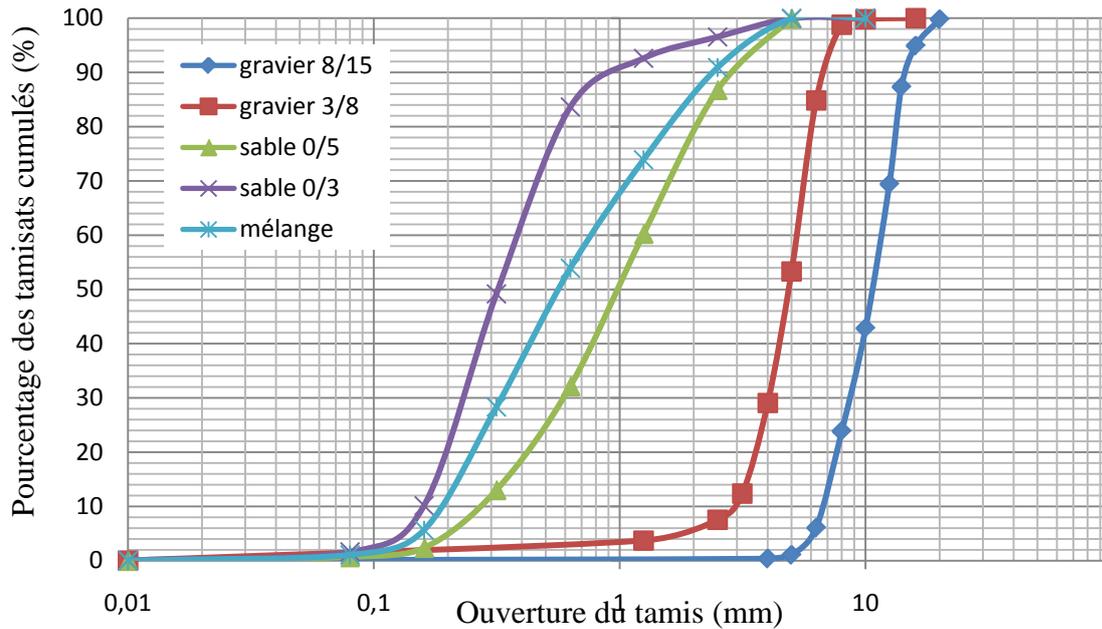


Figure 2.4 : Courbes granulométriques des sables et des graviers.

#### 2.2.4 L'eau de gâchage

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

#### 2.2.5 Le superplastifiant

un seul type de superplastifiant a été utilisé durant cette étude appelé MEDAFLOW 30 fabriqué par l'entreprise GRANITEX, qui est un haut réducteur d'eau de la 3<sup>ème</sup> génération à base de polycarboxylate, conforme à la norme EN 934-2, sa densité est de 1.07, son dosage peut varier de 0.5% à 2% du poids du liant ou ciment selon les performances recherchées.

### 2.3 Formulations adoptées

L'objectif de cette partie est de 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 les rapports sable/mortier et eau/liant, superplastifiant/liant.

Ces paramètres sont optimisés expérimentalement afin d'obtenir des valeurs d'étalement au mini cône d'Abrams et du temps d'écoulement au V-Funnel acceptables sur mortier.

Pour la valorisation de la pouzzolane comme ajout sur le comportement rhéologique du BAP on fixera ces trois rapports (S/M, E/L, SP/L).

### 2.3.1 Formulation du mortier

Les BAP se caractérisent par un faible volume en gros granulats par rapport au BV, donc les propriétés du mortier sont les plus dominante, car ce dernier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Pour l'obtention d'un MAP, notre mortier doit avoir une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statiques et dynamiques, rhéologiquement, cela revient à abaisser le seuil de cisaillement du mortier, tout en maintenant la viscosité plastique du mélange par l'ajout d'un superplastifiant.

Notre travail consiste à déterminé la valeur optimal du superplastifiant pour cela, on a pris les travaux de Boukendakdji [49] comme référence concernant l'optimisation du rapport S/M nous l'avons fixé a 0.5 ainsi que le rapport E/C a 0.4. On fait varier le rapport SP/L entre 1.2% et 2%, pour chaque dosage en mesures l'étalement et le temps d'écoulement.

A la fin la sélection du rapport SP/L est ajusté par l'étalement au mini cône dont le diamètre de la galette de mortier de référence doit être inclut dans une fourchette de 270 mm à 330 mm, et par l'essai V-Funnel dont le temps d'écoulement obtenu doit être entre  $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$  [50].

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.

#### ❖ Séquence de malaxage du mortier

Dans nos essais nous avons opté pour la séquence de malaxage représenté dans la figure (2.5) et qui se résume comme suit :

- malaxer a sec le ciment et le sable pendant 1 minute pour homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité figure (2.6)).

- malaxer pendant 1 minute avec la 1<sup>ère</sup> quantité d'eau (70%).
- malaxer pendant 1 minute avec la 2<sup>ème</sup> quantité d'eau (30% + superplastifiant).
- malaxer le mélange pendant 3 minutes.



Figure 2.5 : Séquence de malaxage du mortier [50].



Figure 2.6 : Malaxeur de mortier.

### 2.3.2 Formulation du béton autoplaçant

Le principe de formulation est de confectionner en premier un BAP de référence c'est-à-dire sans pouzzolane, en fixant les paramètres S/M, E/L, SP/L, présent. Ensuite, en fait varier le pourcentage de la substitution du ciment par la pouzzolane naturelle de 10%, 15%, 20% et 25% et en étudieras l'influence de cette ajout sur le comportement rhéologique du BAP.

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

#### ❖ Séquence de malaxage du béton

La méthodologie d'introduction des constituants et du malaxage adopté et donnée par la figure (2.7) et qui se résume comme suit :

- malaxer a sec le gravier (3/8 et 8/15), sable, pouzzolane, pendant 30 secondes afin d'homogénéiser le mélange (malaxeur utilisé est celui a béton de capacité de 40 litres « figure 2.8 »).
- ajouté pendant 1 minute la 1<sup>ère</sup> quantité d'eau (70%  $E_{eff}$ ).
- ajouté pendant 1 minute la 2<sup>ème</sup> quantité d'eau (30%  $E_{eff}$ ) mélangé avec le superplastifiant.
- malaxer pendant 5 minutes.
- arrêt du malaxage pendant 2 minutes.
- remalaxer pendant 30 secondes.

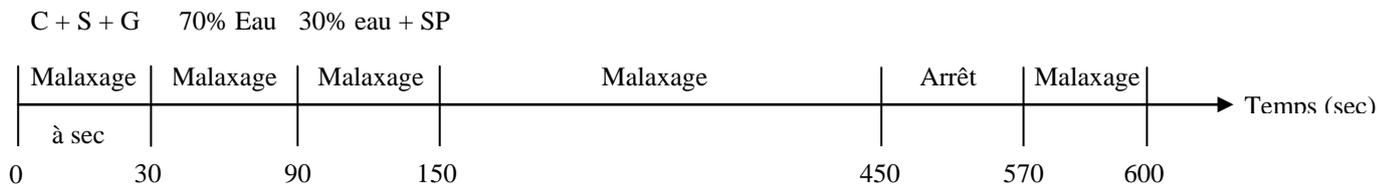


Figure 2.7 : Séquence de malaxage de BAP [50].



Figure 2.8 : Malaxeur a béton.

## 2.4 Caractérisation du mortier des BAP a l'état frais

Rhéologiquement les mortiers en les mêmes propriétés des BAP, pour cela des essais de convenance doivent être utilisés, les plus couramment sont :

### 2.4.1 Essai d'étalement au Mini-Cône

L'essai consiste à remplir un moule tronconique placé sur une plaque métallique lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est prise. Pour un bon MAP le diamètre doit être compris entre 270 mm et 330 mm, et il ne doit présenter ni ressuage ni ségrégation qui peuvent être détectée visuellement [50].

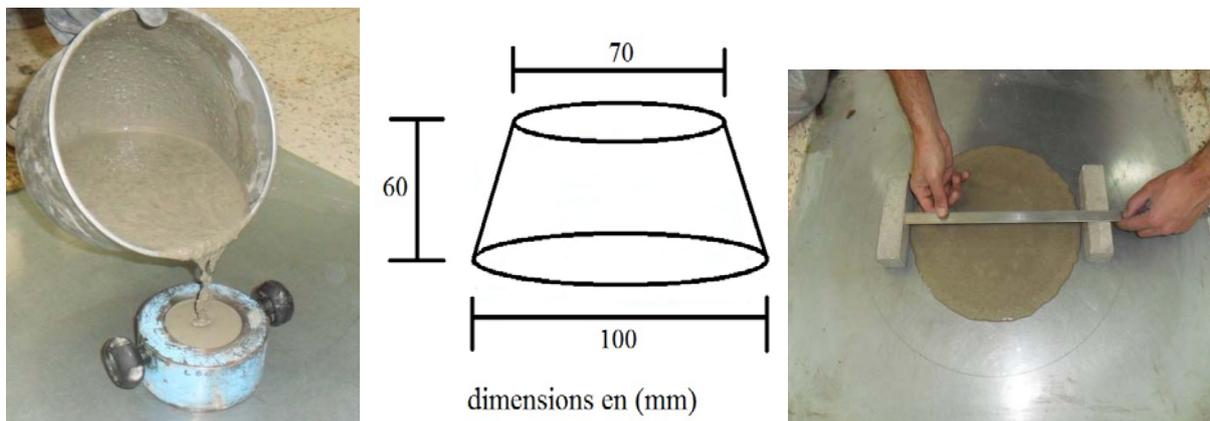


Figure 2.9 : Essai d'Etalement pour Mortier.

### 2.4.2 Essai d'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 1<sup>ère</sup> lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir.

Le temps de l'écoulement doit être compris entre 2 et 10 seconds [50].

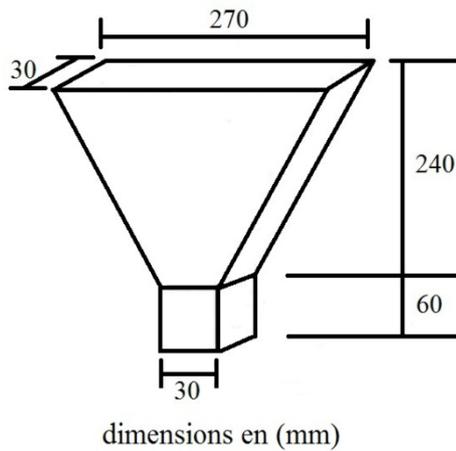


Figure 2.10 : Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier.

## 2.5 Essais effectués sur béton frais

Les guides européens [51] prévoient de caractériser les BAP à l'état frais en prenant compte des trois propriétés clés demandées, et proposent des essais à réaliser pour chacune d'elle.

Les trois propriétés demandées sont :

Capacité de remplissage :

- Cône d'Abrams.
- V-Funnel.

Capacité de passage :

- U-box.
- J-Ring.
- L-box.

Résistance à la ségrégation :

- Essai au tamis de 5mm.

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

### 2.5.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow)

C'est l'essai le plus courant pour évaluer la fluidité du béton, car il est très simple à réaliser

sur chantier. Ce test nécessite un cône d'Abrams et une plaque métallique plane graduée à un diamètre de 50 cm (Figure 2.11).

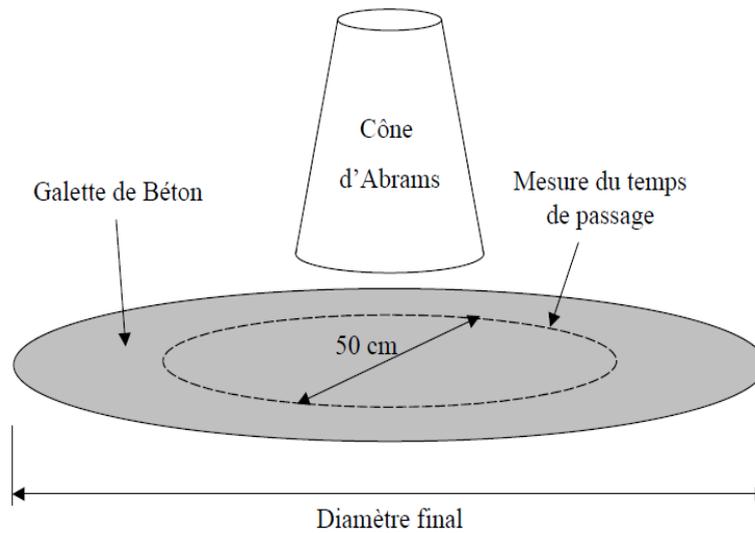


Figure 2.11 : Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow) [52].

L'essai consiste à mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône (Figure 2.12), ainsi que le temps au passage à un diamètre de 50 cm.

Le diamètre de la galette de béton est le paramètre qui caractérise la fluidité, plus il est grand plus le béton est fluide (capacité de remplissage élevée). L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50 cm et 80 cm en fonction de l'utilisation du béton [53].

Cet essai permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).



Figure 2.12 : Mesure du diamètre d'étalement.

Selon EFNARC [51], la mesure de l'étalement au cône d'Abrams, peut être divisée en trois classes. Le tableau (2.4) définit ces trois classes selon le domaine d'utilisation du BAP:

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

Tableau 2.4 : Classification des BAP selon domaine d'utilisation [51].

En général un temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50 cm ( $T_{50}$ ) compris entre 2 et 5 s est acceptable pour obtenir un BAP [53].

### 2.5.2 Essai d'entonnoir en V (V-funnel test)

Cet essai consiste à mettre une quantité de béton frais dans l'entonnoir en forme de « V » (Figure 2.13), le temps d'écoulement est déterminé entre le moment où la trappe est libre et le moment d'apparition de la lumière par l'orifice.

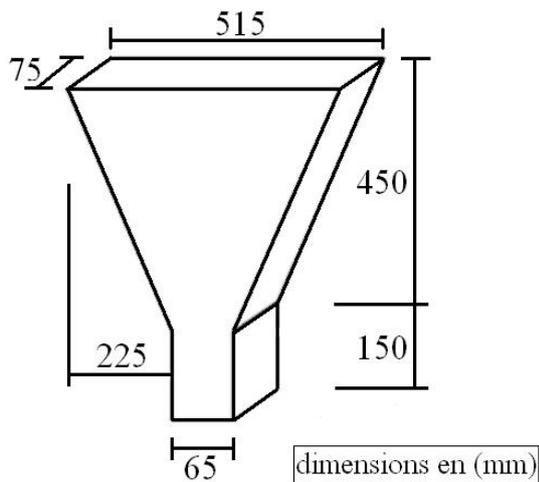


Figure 2.13 : Essai d'entonnoir (v-funnel).

Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes [54].

### 2.5.3 Essai de la boîte en L (L-Box test)

Cet essai consiste à mesurer l'écoulement du béton dans une boîte en L (Figure 2.14), Le principe de l'essai est de remplir entièrement la partie verticale de la boîte de volume de 12,7 litres, laisser le béton se reposer 1 mn puis soulever la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale a travers le ferrailage, on peut mesuré les paramètres suivants :

- ✓ Le temps d'écoulement du béton T20 pour arriver à la distance 200 mm (dans la partie horizontale).
- ✓ Le temps d'écoulement du béton T40 pour arriver à la distance 400 mm (dans la partie horizontale).
- ✓ Une fois l'écoulement du béton achevé, on mesure les hauteurs H1 et H2.

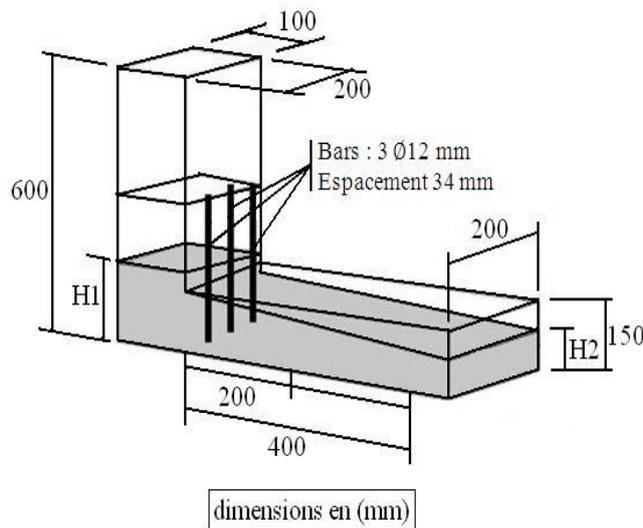


Figure 2.14 : Essai L-Box.

On peut alors calculer le rapport  $H2/H1$ . Pour une bonne capacité de passage, une valeur du rapport entre 0,8 et 0,85 est acceptable. Si on observe un résidu de granulats dans la partie verticale du L (avant les barres de ferrailage), on pourra conclure qu'il y a soit blocage soit ségrégation. Certains auteurs recommandent des valeurs inférieures à 1.5 secondes pour T20 et inférieures à 3.5 secondes pour T40 afin de rester dans un domaine autoplaçant [52].

#### 2.5.4 Essai de stabilité au tamis

L'essai de stabilité au tamis permet de qualifier le BAP vis-à-vis du risque de ségrégation. Cet essai nécessite un seau de 10 litres avec couvercle, un tamis de 5 mm de maille, de diamètre 315 mm et un fond (Figure 2.15). Le test consiste à remplir le seau de 10 litres et à laisser le béton couvert et au repos pendant 15 minutes. Un échantillon de ce béton ( $4,8\text{kg} \pm 0,2\text{kg}$ ) est versé à travers le tamis de 5 mm posé sur le fond, et laissé deux minutes, avant de poser la masse de la laitance traversant le tamis [55].

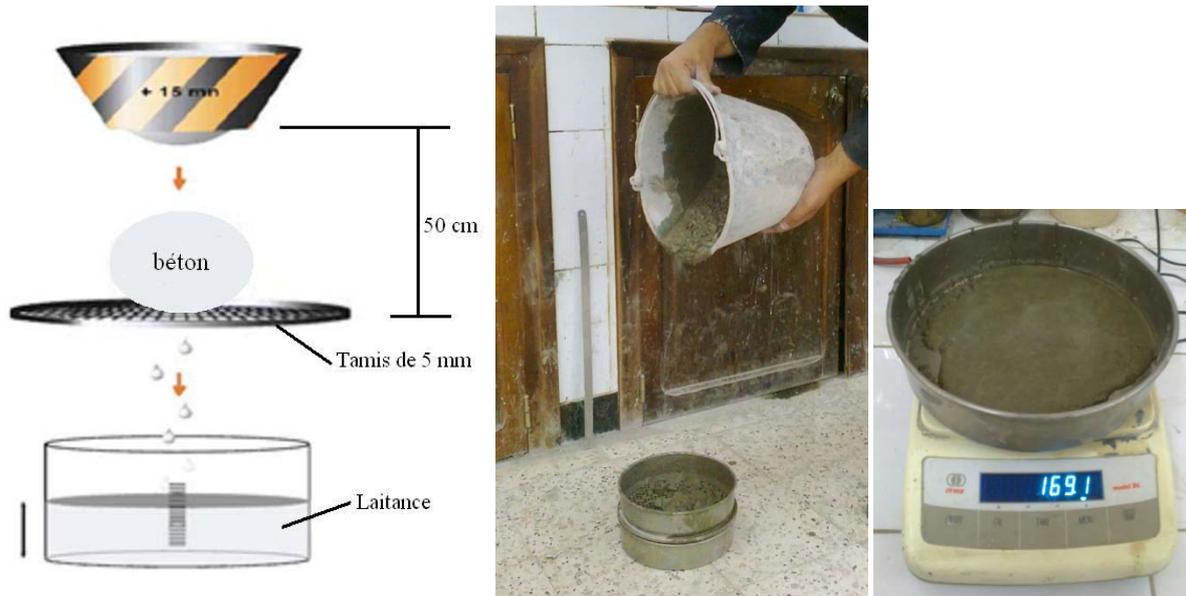


Figure 2.15 : Essai de résistance à la ségrégation au tamis.

Le pourcentage  $\Pi$  de la laitance traversant le tamis par rapport à la masse de l'échantillon est donc calculé [55] :

$$\Pi = \frac{\text{masse de laitance}}{\text{masse de l'échantillon}} \times 100 \quad (2.1)$$

La mesure de pourcentage de laitance conduit à classer les formulations de béton autoplaçant de la façon suivante :

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

Tableau 2.5 : Critères de stabilité [55].

## 2.6 Essais effectués sur béton durci

### 2.6.1 Essai de compression

L'essai de compression consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression axiale (figure 2.16). La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette (figure 2.16).

L'objectif de cet essai est de suivre l'évolution de la résistance à la compression et le comportement des différents BAP confectionné.

Les essais de compression sont effectués sur des éprouvettes cubiques de 10 cm de côté.



Figure 2.16 : Essai de compression [(a) éprouvette avant compression, (b) éprouvette après compression].

### 2.6.2 Essai d'absorption capillaire

Le béton est en effet un matériau qui possède des pores capillaires dont la dimension varie suivant ses caractéristiques de composition, notre essai consiste à mesurer la quantité d'eau absorbée par le béton.

Le matériel utilisé pour cet essai est un bac qui contient de l'eau à épaisseur de  $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  au delà des cales de 1cm de hauteur. Les éprouvettes utilisées dans l'essai sont de dimension

7x7x28 cm, après séchage, la résine utilisée dans les 4 coté latéraux des éprouvettes en laissons juste la face cisailier en contact avec l'eau, ainsi qu'une balance pour peser les éprouvettes. (Figure 2.17).

L'absorption est mesurée après 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81 mn, 2, 3, 4, 5, 6 h et 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 jours.



Figure 2.17 : Essai d'absorption capillaire.

### 2.6.3 Essai de perméabilité a l'eau

L'appareil utilisé pour cet essai est le perméabilimètre à l'eau (figure 2.18). En mettra des éprouvettes cubique de 15 cm de côté dans l'appareil pendant 24h sous une pression constante (3 bars) à la fin du teste en découpe les éprouvettes en deux par l'essai de traction par fendage (figure 2.19) et en mesure les différentes hauteurs d'eau pénétré (figure 2.20).



Figure 2.18 : Perméabilimètre a l'eau.



Figure 2.19 : Découpage des éprouvettes.

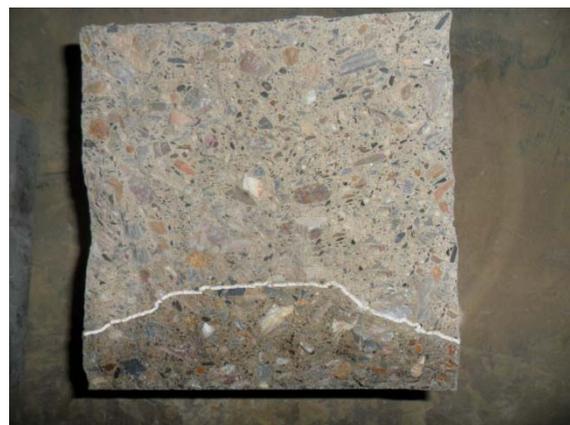


Figure 2.20 : Mesure de pénétration d'eau.

## 2.7 Conclusion

On peut conclure de ce chapitre qu'en suivant la méthode de formulation japonaise modifiée par DOMONE, on a pu confectionner un MAP ainsi qu'un BAP en utilisant les matériaux locaux, après réalisation de plusieurs essais sur mortier et béton.

Les résultats de ces essais obtenus seront présentés et interprétés dans le troisième chapitre ainsi comparés avec ceux obtenus par la littérature.

## **CHAPITRE 3**

# **RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET INTERPRÉTATIONS**

## CHAPITRE 3

### RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

#### 3.1 Introduction

Le but de ce chapitre est d'interpréter les résultats obtenus pour les différents essais réalisés, on commençant tout d'abord par les essais effectués sur mortier afin d'optimiser le rapport SP/L que l'on pourra utiliser par la suite dans la confection de notre béton autoplaçant.

Deuxième étape est l'étude des résultats des essais effectués sur BAP après la fixation de tout les paramètres en laissant qu'une seule variable c'est le pourcentage de la PZN par rapport a la quantité de ciment.

#### 3.2 Optimisation de dosage du superplastifiant

Pour l'obtention d'un bon BAP en doit certainement avoir un bon MAP car les propriétés de se dernier sont semblables a celle du BAP lui-même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous l'effet de la gravité ainsi une viscosité plastique suffisante pour éviter la ségrégation du béton durant l'écoulement, en effet pour assurer une bonne ouvrabilité le rapport S/M est fixé a 0.5 [49].donc l'optimisation des dosages des constituants de la pâte de ciment est nécessaire pour que les critères d'ouvrabilité de l'essai d'étalement au cône et de l'écoulement au V-Funnel serons satisfaisantes.

Pour la détermination du dosage optimal du superplastifiant (SP/L) nous avons étudié la variation d'étalement au mini cône, ainsi que le temps d'écoulement au V-Funnel du mortier pour les pourcentages de SP suivant : (1,1 ; 1,3 ; 1,5 ; 1,7 ; 1,8 ; 1,9 et 2,1%), avec des rapports de S/M et E/L fixé à 0,5 et 0,4 (par poids), le tableau 3.1 représente les différentes composition des mortiers pour chaque pourcentage de SP.

Composition	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Eau (kg/m <sup>3</sup> )	Superplastifiant (%)	Superplastifiant (kg/m <sup>3</sup> )
MAP 1	685.9	1310.5	250.5	1.1	7.5
MAP 2	685.9	1310.5	249.6	1.3	8.9
MAP 3	685.9	1310.5	248.6	1.5	10.3
MAP 4	685.9	1310.5	247.7	1.7	11.7
MAP 5	685.9	1310.5	247.2	1.8	12.3
MAP 6	685.9	1310.5	246.7	1.9	13.0
MAP 7	685.9	1310.5	245.7	2.1	14.4

Tableau 3.1 : Composition des mortiers pour différents pourcentages de SP/L.

### 3.2.1 Étalement au mini cône pour les mortiers

Les valeurs concernant l'essai au mini cône sont représentées dans le tableau 3.2.

Superplastifiant (%)	1,1	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	2,1
Étalement (mm)	284	295	297	301	303	303	308

Tableau 3.2 : valeurs d'étalement en fonction du dosage du superplastifiant.

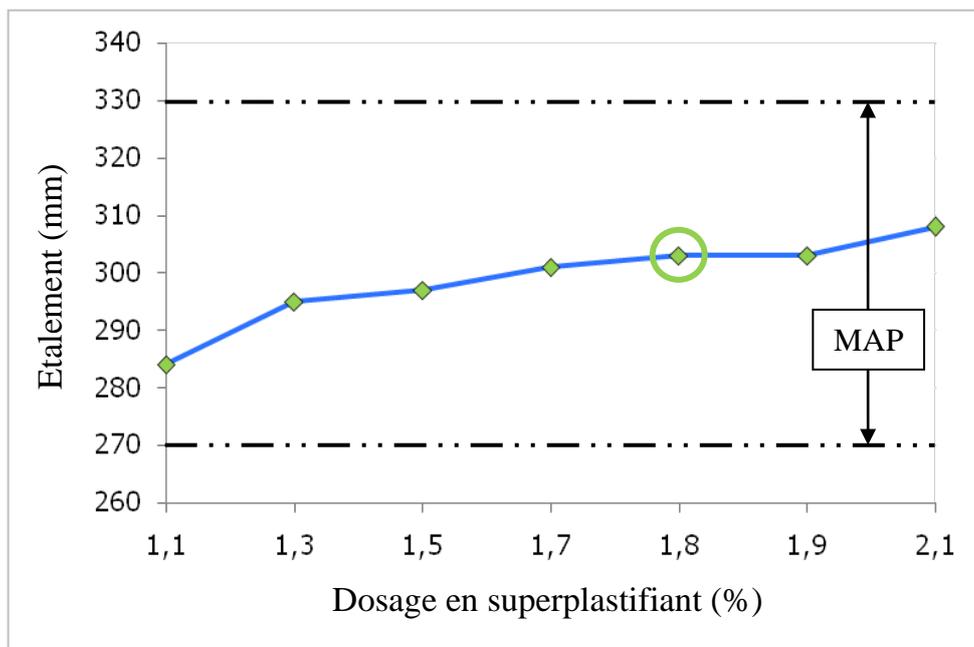


Figure 3.1 : Variation d'étalement en fonction du dosage du superplastifiant.

On remarque pour les différents dosages de superplastifiant les valeurs d'étalement obtenus sont tous acceptable c'est-à-dire entre 270 et 330 mm selon Domone et Jin [50]. Par contre, pour le dosage de superplastifiant de 2.1% une forte ségrégation ainsi un ressuage détecté visuellement à l'œil nu (figure 3.2 (b)), et pour le dosage de 1.9% de superplastifiant envois une bande de ressuage de 3cm autour de la galette, en revanche la meilleur galette obtenu c'est-à-dire qui ne présente aucun phénomène ni de ressuage ni de ségrégation est celle du dosage de 1.8% de superplastifiant (figure 3.2 (a)).



Figure 3.2 : (a) dosage de 1.8% de SP. (b) dosage de 2.1% de SP.

### 3.2.2 Temps d'écoulement à l'entonnoir en V

Les valeurs concernant l'essai à l'entonnoir en V sont représentées dans le tableau 3.3.

La figure 3.3 montre que le temps d'écoulement à l'entonnoir en V des mortiers diminue avec l'augmentation de la teneur en superplastifiant, jusqu'à un certain dosage de 1.8%, où à partir duquel le temps d'écoulement augmente légèrement, ainsi que la majorité des dosages de superplastifiant donne des valeurs de temps d'écoulement comprise entre 2 et 10 secondes selon Domone et Jin [50].

Superplastifiant (%)	1,1	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	2,1
Temps d'écoulement (sec)	16,38	11,24	9,23	8,83	8,21	9,25	8,70

Tableau 3.3 : valeurs de temps d'écoulement en fonction du dosage du superplastifiant.

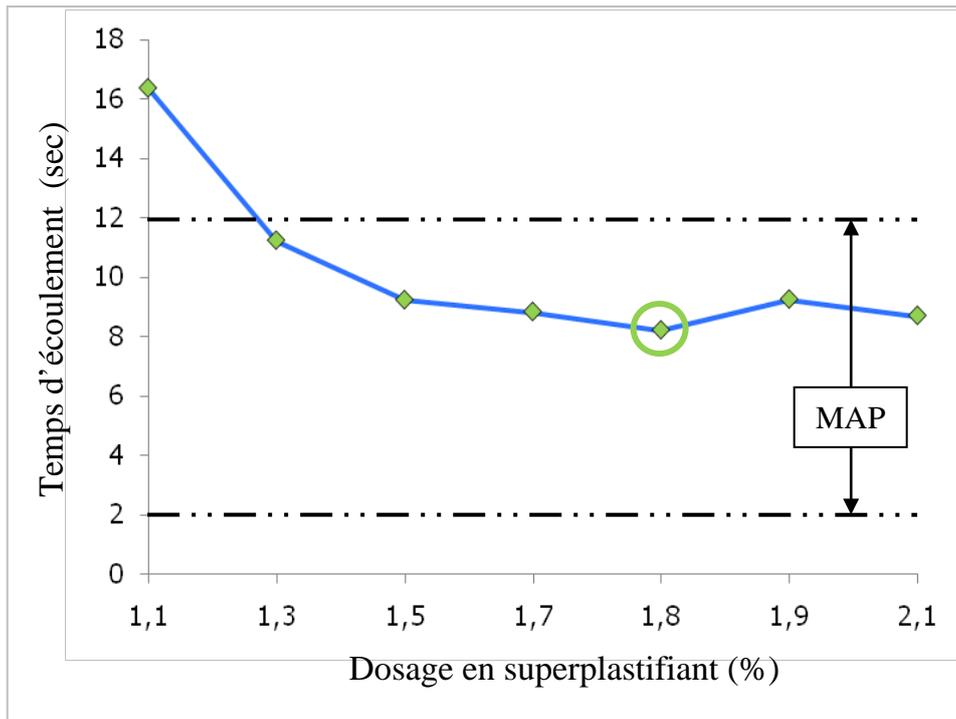


Figure 3.3 : Variation de temps d'écoulement en fonction du dosage du superplastifiant.

D'après les deux figures 3.1 et 3.2 on constate que le dosage optimal du superplastifiant est de 1,8%. En argumentant ce choix par le fait qu'il donne des valeurs d'étalements au mini cône ainsi au temps d'écoulement au V-Funnel acceptables sans présence de ressuaage ni de ségrégation.

On remarque que se dosage est proche a celui de saturation, c'est-à-dire au delà de 1,8% l'effet du superplastifiant sur la rhéologie du mortier devient moins important. Cette saturation du système provoque une augmentation des frottements entre les granulats et diminue la cohésion du mélange.

D'après Bethmont [56], le dosage de saturation est celui au dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la rhéologie du mélange.

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

Le but consiste à analyser l'effet de la PZN sur l'ouvrabilité d'un BAP à l'aide de différents essais cités dans le chapitre 2. Ceci nous permet d'étudier la variation de l'ouvrabilité en fonction de la variation de la PZN. Dans cette partie on doit contrôler surtout la ségrégation, phénomène de blocage ainsi que le ressuaage.

Le tableau 3.4 donne la composition des cinq BAP testés contenant de la PZN qui varie de 0, 10, 15, 20 et 25% avec comme béton de référence le BAP R qui contient 0% de PZN. Les proportions ont été calculées selon la procédure donnée en annexe « B » en gardant les valeurs de (S/M = 0.5, E/L = 0.4, SP/L = 1.8) prise dans le confectionnement du MAP comme des valeurs fixe.

Composition	BAP R	BAP 1	BAP 2	BAP 3	BAP 4
	0% PZN	10% PZN	15% PZN	20% PZN	25% PZN
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	491	443	419	395	371
Pouzzolane (kg/m <sup>3</sup> )	0,00	46	70	93	117
Gravier 3/8 (kg/m <sup>3</sup> )	248	248	248	248	248
Gravier 8/15 (kg/m <sup>3</sup> )	495	495	495	495	495
Sable (kg/m <sup>3</sup> )	924	924	924	924	924
Eau (kg/m <sup>3</sup> )	196	196	195	195	195
Superplastifiant (kg/m <sup>3</sup> )	8,84	8,81	8,8	8,79	8,78

Tableau 3.4 : composition des BAP testés.

### 3.3.1 Etalement et temps T<sub>50</sub> 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 valeurs concernant l'essai au cône d'Abrams sont données par le tableau 3.5, les figures 3.4 et 3.5 présentent la variation d'étalement et du T<sub>50</sub> en fonction de la teneur en PZN.

PZN %	0	10	15	20	25
Etalement (mm)	737	722	704	643	607
Etalement admissible (mm)	600 - 800	600 - 800	600 - 800	600 - 800	600 - 800
T <sub>50</sub> (s)	4,68	3,48	4,25	5,13	6,84
T <sub>50</sub> admissible (s)	2 - 5	2 - 5	2 - 5	2 - 5	2 - 5

Tableau 3.5 : valeurs d'étalements et du temps T<sub>50</sub> au cône d'Abrams.

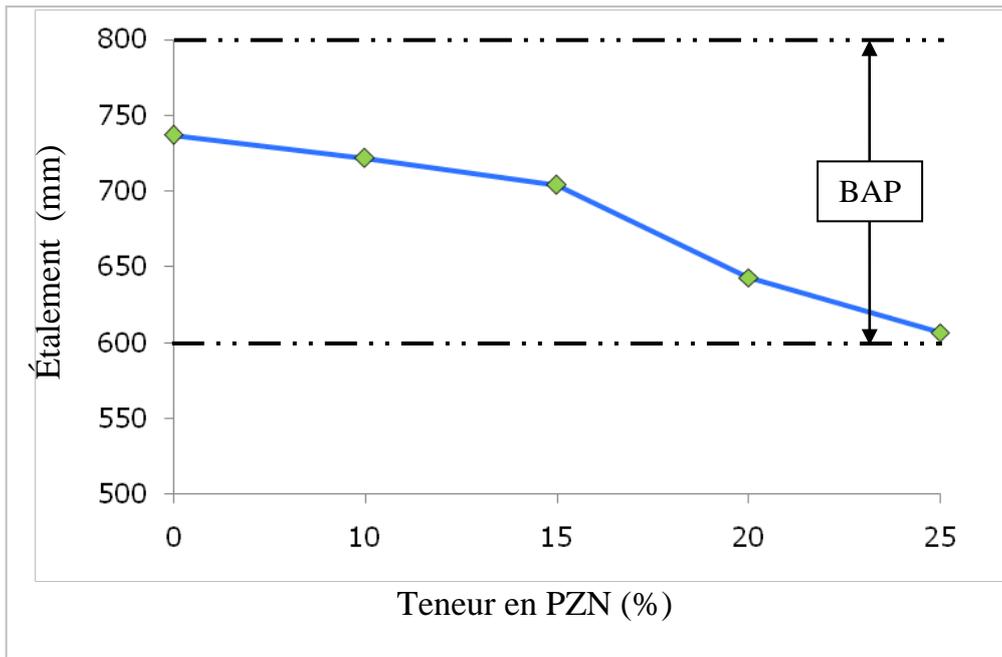


Figure 3.4 : Etalement en fonction de la teneur en PZN.

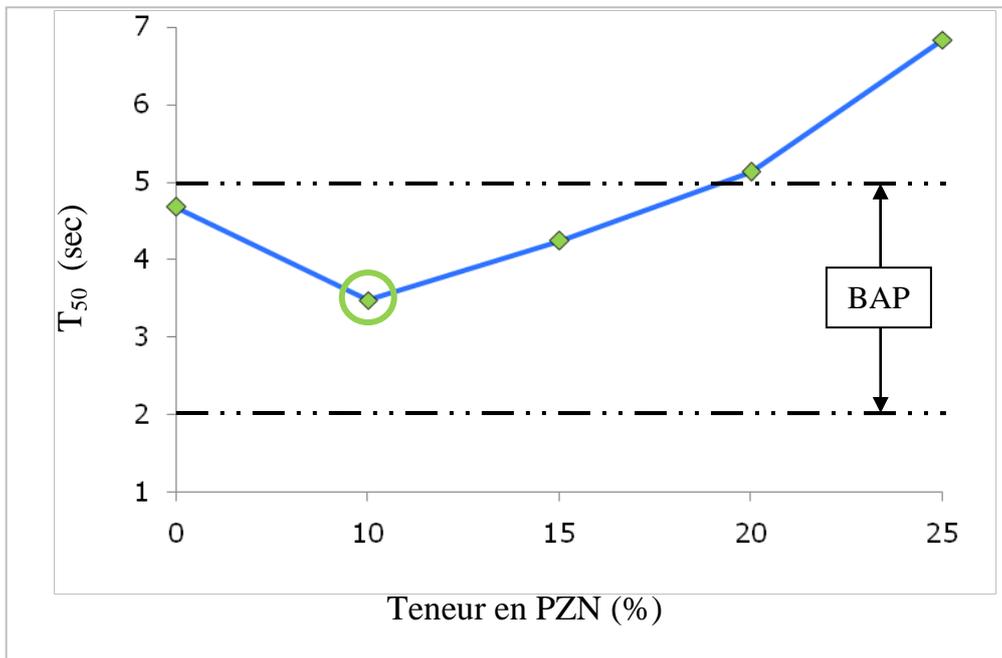


Figure 3.5 : Temps T<sub>50</sub> en fonction de la teneur en PZN.

### 3.3.1.1 Effet de la PZN

Pour un taux de substitution de 0% a 25% on remarque que l'étalement de la galette du béton diminue de 737 mm a 607 mm, une diminution de 18%, mais en restant toujours dans la marge des valeurs correspondante au BAP selon l'EFNARC [54].

Cette diminution d'étalement est due a l'absorption de l'eau plus élevé de la PZN, en plus, ont peut remarquer a partir des figures 3.4 et 3.5 qu'un taux de substitutions de 10% donne la plus faible valeur de  $T_{50}$  (3,48 s) avec un étalement acceptable de 722 mm, et une galette ne contient ni ressuage ni ségrégation (figure 3.6). Dans ce cas, on constate que le taux de 10% peu être considéré comme un dosage optimale qui permet de vérifier la capacité de remplissage.



Figure 3.6 : Galette du BAP 1 (10% de PZN).

Il existe pas mal de travaux antérieur qui ont permet d'interpréter l'influence de la PZN comme ajout sur le besoin en eau. Cela, nous permet de confirmé ou non la perte d'ouvrabilité au cône d'Abrams causé par cet ajout.

D'après Turanli et Uzal et Bektas [57], l'augmentation de la demande en eau est due à la nature microporeuse et la forme angulaire des particules de la PZN. La forme arrondis des particules de la PZN avec des surfaces rugueuses donne une capacité d'absorption très élevée d'eau dans les pâtes de ciment. De plus, l'existence de la minérale zéolite qui a pour rôle d'incorporer les molécules d'eau dans la structure interne de la PZN.

Kaid et al. [58], 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 ( $\tau_0$ ) 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 [59].

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, et qui ont permis de perfectionner l'interprétation de l'effet de perte d'ouvrabilité causé par l'utilisation de la PZN comme substitution du ciment.

### 3.3.2 Temps d'écoulement au V-Funnel

L'essai consiste à évaluer la capacité de remplissage de BAP en mesurant le temps d'écoulement à l'entonnoir (en seconde). Les valeurs concernant l'essai au V-Funnel sont données par le tableau 3.6, La figure 3.7 présente la variation du temps d'écoulement en fonction de la teneur en PZN.

PZN %	0	10	15	20	25
$T_{V-Funnel}$ (s)	11,85	10,65	12,35	13,8	15,42
$T_{V-Funnel}$ admissible (s)	6 – 12	6 - 12	6 - 12	6 - 12	6 - 12

Tableau 3.6 : valeurs de temps d'écoulement au V-Funnel ( $T_{V-Funnel}$ ).

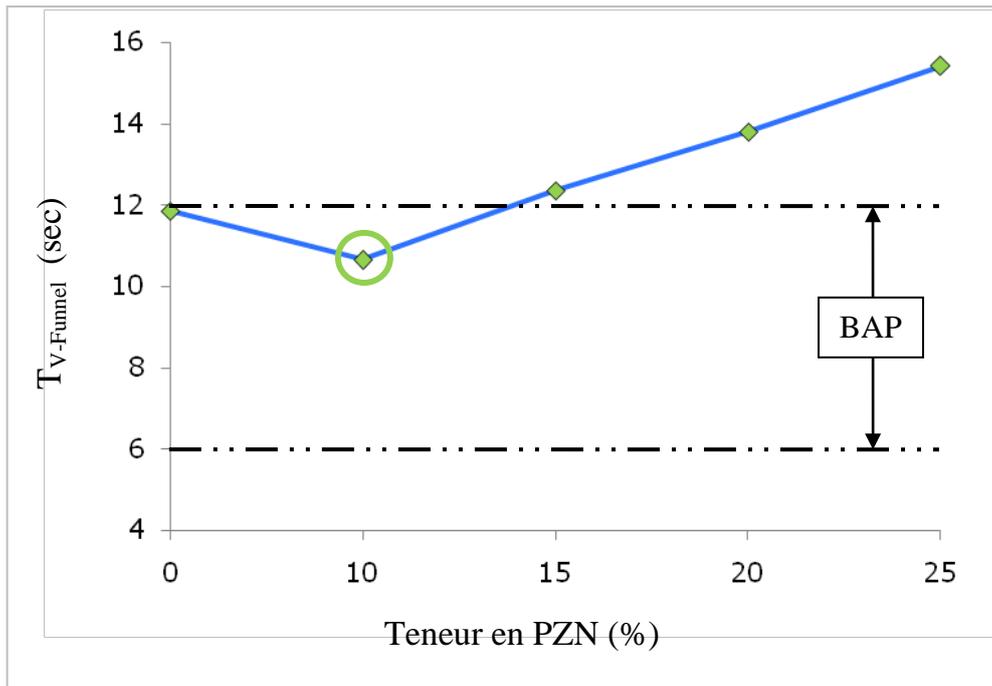


Figure 3.7 :  $T_{V-Funnel}$  en fonction de la teneur en PZN.

On remarque que les valeurs de  $T_{V-Funnel}$  augmentent avec l'augmentation de dosage de la PZN, ainsi que ces valeurs dépassent légèrement la limite recommandée pour les BAP c'est-à-dire 12 s [54], à part l'optimum qui est obtenu à 10% de PZN dont sa valeur est de 10,68 s, on a remarqué pour le mélange BAP 25 un blocage de quelques secondes, cela signifie qu'il a eu une ségrégation dynamique.

Allali [48], à effectuer le même travail que nous sauf que le type de ciment utilisé était le CEM I 42,5, il a trouvé que pour tous les pourcentages de substitutions de PZN le  $T_{V-Funnel}$  étaient au Delas des valeurs admissible, a part celle de 15% de PZN qui est (12.8 s) la plus proche de la valeur admissible.

Uysal et Sumer [60], 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 vérifiés la limite admissible de  $T_{V-F}$ . Par conséquent, un  $T_{V-F}$  supérieur à 15 s serait très cohésif et difficile à manipulé, Par conséquent, on peut conclure que la substitution du ciment par la PZN augmente légèrement la valeur du temps d'écoulement au V-Funnel.

Diamantonis et al. [61], 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.

### 3.3.3 Résultats de L-Box

Cet essai 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 3.7, et la figure 3.8.

PZN %	0	10	15	20	25
$H_2/H_1$	0,77	0,84	0,76	0,71	0,63
$H_2/H_1$ admissible	0,8 - 1	0,8 - 1	0,8 - 1	0,8 - 1	0,8 - 1

Tableau 3.7 : valeurs du rapport  $H_2/H_1$  de l'essai L-Box.

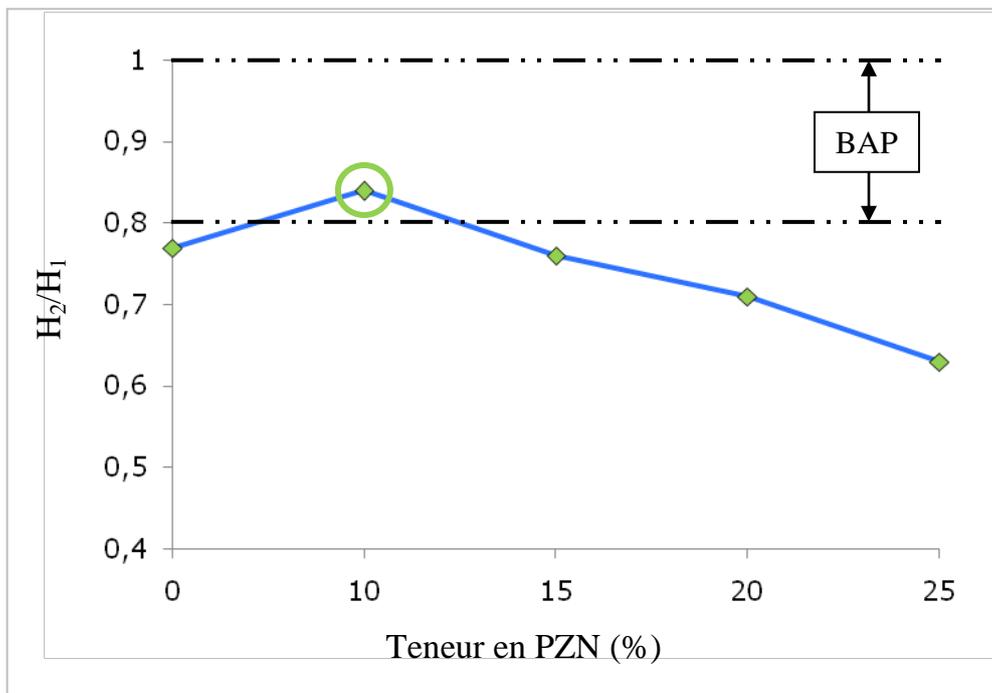


Figure 3.8 : Rapport  $H_2/H_1$  en fonction de la teneur en PZN.

Toutes les valeurs se trouvent hors domaine des BAP c'est-à-dire inférieur à 0.8 à part celle de 10% de PZN qui est égale à 0.84, ces valeurs diminuent en augmentant la teneur en PZN, ces résultats peuvent être interprétés par l'augmentation de la cohésion de mélange ce qui implique un blocage au niveau des barres de ferrailage, ainsi on a remarqué pour 25% de PZN un blocage au niveau des barres d'acier.

Sonebi et al [62] 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 [63] 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.

Allali [48], à effectuer le même travail que nous sauf que le type de ciment utilisé était le CEM I-42,5, il a trouvé que pour tous les pourcentages de substitutions de PZN le rapport  $H_2/H_1$  étaient inférieurs aux exigences (0,8), ce qui confirme nos résultats.

b) Temps  $T_{20}$  et  $T_{40}$

Les résultats de  $T_{20}$  et  $T_{40}$  sont donnés par le tableau 3.8, et les figures 3.9, 3.10.

PZN %	0	10	15	20	25
$T_{20}$ (s)	1,05	0,66	0,88	1,24	2,15
$T_{20}$ admissible (s)	< 2 sec				
$T_{40}$ (s)	3,64	3,12	3,97	4,63	5,74
$T_{40}$ admissible (s)	< 3,5 sec				

Tableau 3.8 : valeur de  $T_{20}$  et  $T_{40}$  de l'essai L-Box.

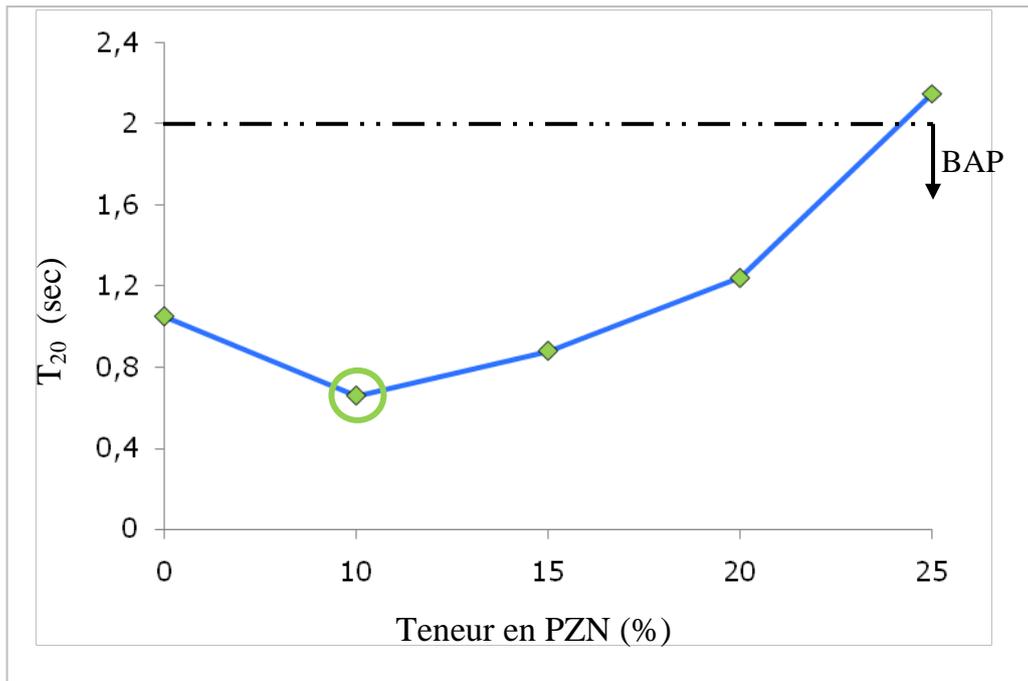


Figure 3.9 : Temps  $T_{20}$  en fonction de la teneur en PZN.

On remarque que la majorité des valeurs de  $T_{20}$  se trouve dans le domaine des BAP, ainsi que le temps augmente avec l'augmentation de la teneur en PZN, et le minimum est obtenu pour la valeur de 10% de PZN.

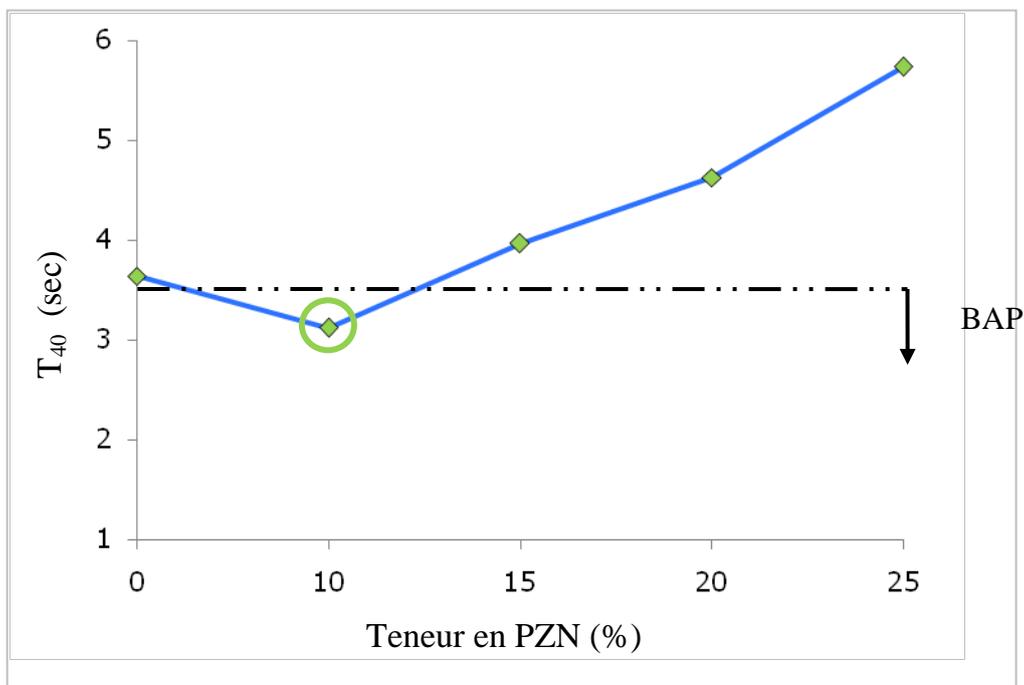


Figure 3.10 : Temps  $T_{40}$  en fonction de la teneur en PZN.

On remarque que toutes les valeurs de  $T_{40}$  se trouvent hors du domaine des BAP à part celle de 10% de PZN ou le minimum est obtenu, ainsi que le temps augmente avec l'augmentation de la teneur en PZN.

Par conséquent, on peut conclure qu'un taux de substitution de 10% de ciment par la PZN présente un dosage optimal.

### 3.3.4 Résistance a la ségrégation par tamisage

Le tableau 3.9 et la figure 3.11 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.

PZN %	0	10	15	20	25
$\Pi$ (%)	7,72	7,23	6,42	5,84	5,06
$\Pi$ admissible (%)	< 15 %	< 15 %	< 15 %	< 15 %	< 15 %

Tableau 3.9 : valeurs de laitance.

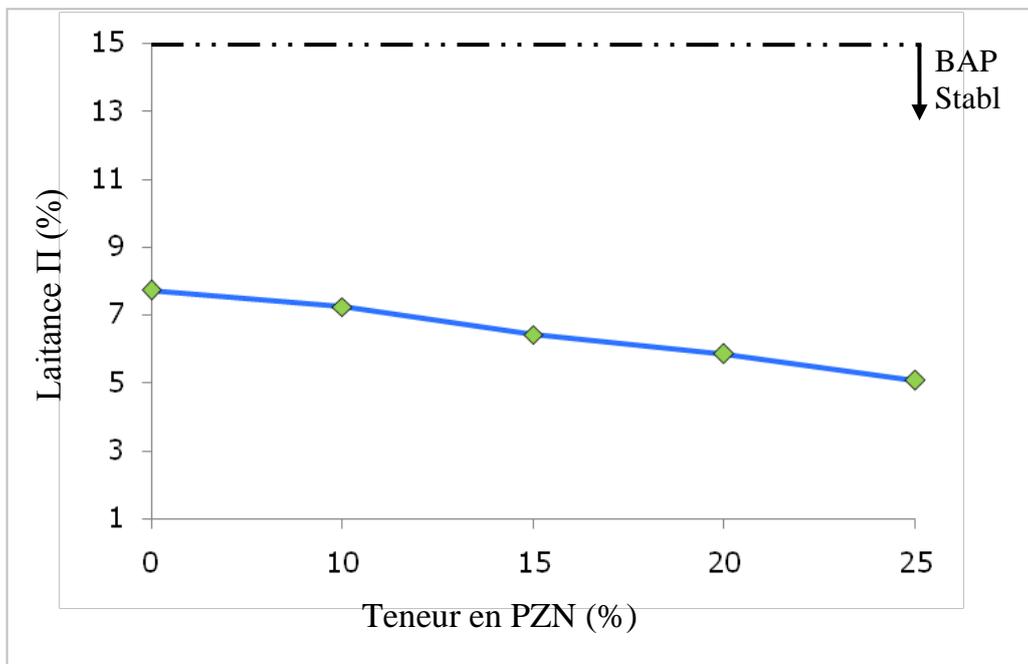


Figure 3.11 : laitance en fonction de la teneur en PZN.

On remarque que la laitance diminue en fonction de l'augmentation de la teneur en PZN, donc l'ajout de la PZN provoque une baisse de la ségrégation statique, ainsi que toutes les valeurs de laitance trouvée présentent une stabilité satisfaisante selon les recommandations de l'EFNARC [54].

Liu [64], 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 [65] 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 [66] 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 80% et 100% ont une viscosité plus élevée que ceux à un taux de substitution inférieur, cela peut entraîner une baisse de ségrégation.

### 3.4 Effet de la teneur en pouzzolane naturelle sur les propriétés des BAP à l'état durci

#### 3.4.1 Résistance à la compression

Le tableau 3.10 résume les résultats de l'essai de la résistance à la compression à différents âges.

			Résistance a la compression			
			7 jours	28 jours	56 jours	90 jours
0 % PZN	Rc <sub>j</sub> (Mpa)	Rc <sub>1</sub>	39.70	54.66	72.40	74.89
		Rc <sub>2</sub>	40.59	53.82	68.01	72.45
		Rc <sub>3</sub>	42.98	55.63	71.29	71.23
	Rc <sub>moy</sub> (Mpa)		<b>41.09</b>	<b>54.70</b>	<b>70.57</b>	<b>72.86</b>
	Ecart type (Mpa)		1.70	0.91	2.28	1.86
10 % PZN	Rc <sub>j</sub> MPa	Rc <sub>1</sub>	32.40	40.60	56.71	62.10
		Rc <sub>2</sub>	33.50	42.88	55.27	62.49
		Rc <sub>3</sub>	34.42	41.36	57.54	63.78
	Rc <sub>moy</sub> (Mpa)		<b>33.44</b>	<b>41.61</b>	<b>56.51</b>	<b>62.79</b>
	Ecart type (Mpa)		1.01	1.16	1.15	0.88

Tableau 3.10 : Résultats de la résistance à la compression des bétons autoplaçants.

La figure 3.12 montre la variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en PZN à différents âges.

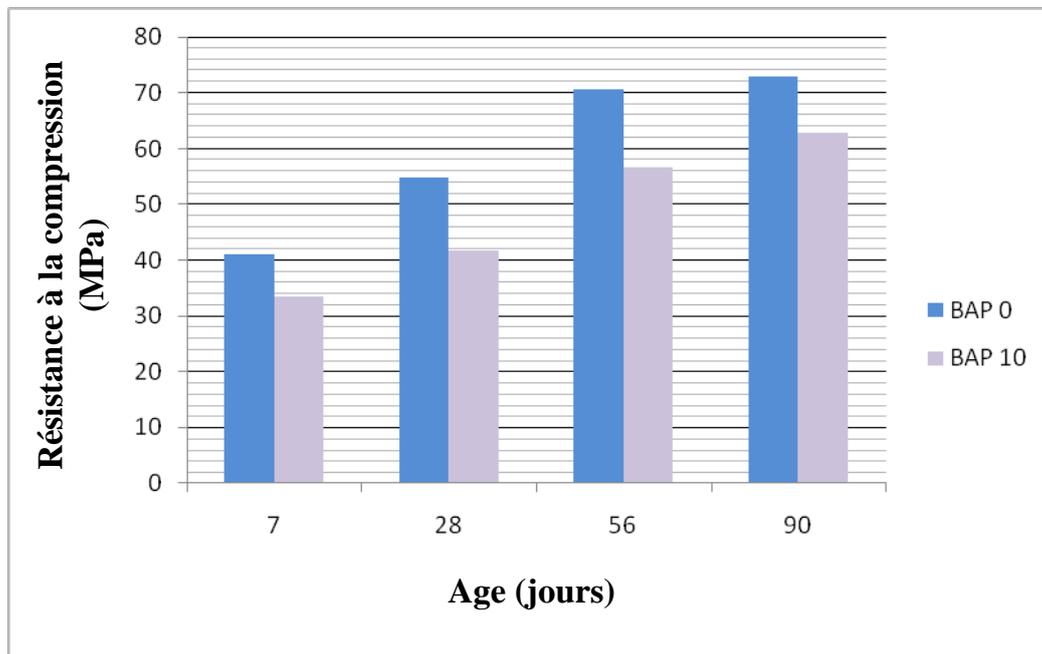


Figure 3.12 : Variation de la Résistance à la Compression en fonction du Temps.

D'après la figure ci-dessus on remarque que l'évolution de la résistance du BAP avec 10% de la PZN est plus faible que celle du BAP sans ajout, ainsi, on remarque que les valeurs des résistances du BAP avec 10% de substitution de la pouzzolane naturelle obtenues pour chaque âge est en croissance jusqu'à 90 jours où on obtient une valeur de 62.79 MPa qui peut être acceptable vu l'écart entre elle et celle du BAP sans ajout qui est égale à 13%.

Krachaï et al [67] ont fait le même travail que nous mais le type de ciment utilisé est le CPJ 32.5 ainsi que les granulats utilisés ne sont pas les mêmes, ils ont constaté que l'écart des résistances à la compression des BAP testées par rapport au BAP témoin est respectivement de 18% et 1% à 28 jours, Mais au-delà de 90 jours on ne distingue pas de différence notable avec ces bétons qui se traduit par une augmentation respectivement de 5,2 % et 0,9 %, ce qui conduit à conclure que la valeur optimale de fillers pouzzolaniques de 15 % a enregistré des meilleurs résultats de résistance.

Une pouzzolane est un matériau capable de fixer la chaux à la température ambiante et de former des composés ayant des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire pouvant faire prise et durcir par hydratation. Il est indispensable que la pouzzolane soit finement broyée, car seul cet état permet à la silice de se combiner avec l'hydroxyde de calcium (produit par

l'hydratation du ciment portland) en présence d'eau pour former des silicates de calcium stables ayant des propriétés hydrauliques. La silice doit être amorphe, c'est-à-dire vitreuse, étant donné que la silice cristallisée a une très faible réactivité. [68]

D'après Paya et al [69] et M. Ghrici et al [70], ont conclu que l'activité pouzzolanique augmente avec l'âge et ne peut être efficace qu'à partir de 28 jours. Ce qui montre que l'activité des pouzzolanes naturelles est très lente au jeune âge. Ce qui conduit à dire que la réaction pouzzolanique continue sa réaction à long terme en formant un deuxième C-S-H supplémentaire, et qui augmente avec le dosage de l'ajout pouzzolanique.

- Ecart type

La dispersion de la résistance autour de la moyenne est fonction de l'écart type.

L'écart type est défini comme suit :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (X_i - m)^2}{n-1}} \quad (3.1)$$

Ou :  $X_i$  = la résistance de l' $i^{\text{ème}}$  éprouvette.

$m$  = la moyenne arithmétique des résistances.

$n$  = le nombre des éprouvettes.

Le calcul de l'écart type et les faibles valeurs enregistrées montrent la fiabilité des résultats que ce soit pour l'appareillage utilisé ou bien pour l'homogénéité des éprouvettes, ceci est satisfaisant vu les précautions prêtes lors de coulages des bétons jusqu'à la réalisation des essais.

### 3.4.2 Perméabilité à l'eau

Le tableau 3.11 regroupe les résultats de pénétration d'eau sous pression des deux bétons celui de référence c-à-dire sans ajout et l'autre de 10% de PZN. Ces résultats sont représentés dans la figure 3.13.

Taux de PZN (%)		Profondeur de pénétration (mm)			
		0		10	
28 jours	Eprouvette 1	44.5	43.7	Eprouvette 1	55.4
	Eprouvette 2	43.1		Eprouvette 2	54.2
	Eprouvette 3	43.5		Eprouvette 3	56.9
				55.5	

Tableau 3.11 : Valeurs de la profondeur de pénétration d'eau sous pression des deux bétons.

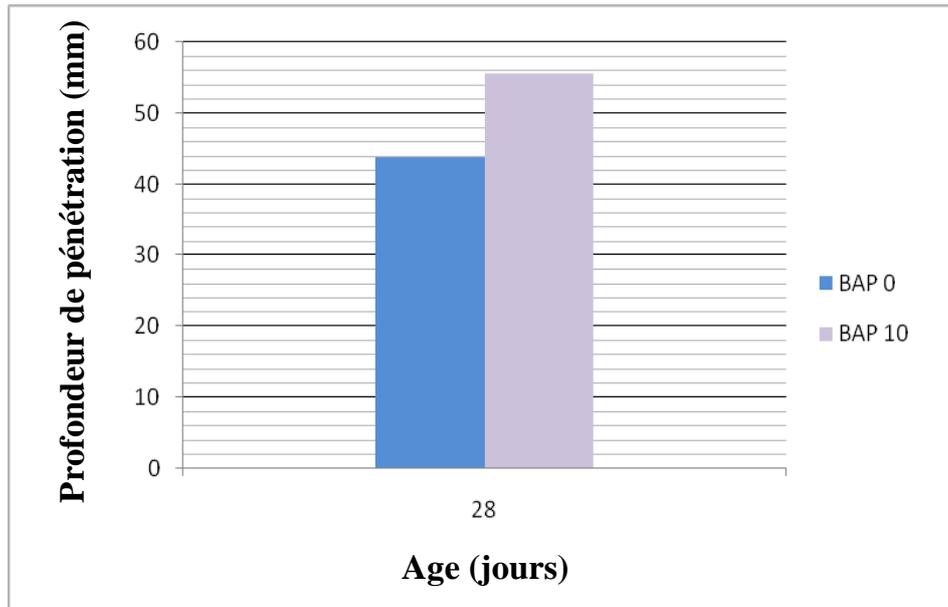


Figure 3.13 : Profondeur de pénétration d'eau des deux bétons à 28 jours (E/L=0.40).

A 28 jours, le béton au PZN présente une profondeur de pénétration d'eau un peu grande à celle du béton à base du ciment sans ajout, donc on note que la profondeur de pénétration d'un BAP avec une substitution de ciment de 10% par la PZN représente 73% de celle d'un BAP avec 100% de ciment. Cette profondeur peut être expliquée par la nature poreuse de la PZN ce qui facilite la pénétration d'eau dans notre béton est aussi la tardivité de l'hydratation de la PZN ce qui implique un lent remplissage des pores de la matrice cimentaire.

### 3.4.3 Absorption d'eau par capillarité

Les figures 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 et 3.18 montrent le taux d'absorption d'eau (initial et secondaire) en fonction de la racine carrée du temps, pour deux types de bétons (BAP 0 et BAP 10) avec un rapport E/L=0.40. Le tableau 3.12 présente les valeurs moyennes d'absorption d'eau calculées par la relation suivante :

$$I = \frac{M}{(axd')} \quad (3.2)$$

Tel que : M = la masse d'eau absorbée (g).

I = absorption d'eau (mm).

a = la surface de l'éprouvette en contact avec l'eau (mm<sup>2</sup>).

d' = la densité de l'eau (g/mm<sup>3</sup>).

Temps (T)	T (s <sup>1/2</sup> )	BAP 0% PZN		BAP	
		M (g)	I (mm)	M (g)	I (mm)
4 min	15.5	0.6	0.12	0.6	0.12
9 min	23.2	0.8	0.16	1.0	0.20
16 min	31.0	1.0	0.20	1.3	0.27
25 min	38.7	1.2	0.24	1.6	0.33
36 min	46.5	1.4	0.29	1.8	0.37
49 min	54.22	1.6	0.33	2.1	0.43
64 min	62.0	1.7	0.35	2.3	0.47
81 min	69.7	2.0	0.41	2.5	0.51
2 h	84.9	2.2	0.45	2.9	0.59
3 h	103.9	2.4	0.49	3.4	0.69
4 h	120.0	2.8	0.57	3.8	0.78
5 h	134.2	3.0	0.61	4.1	0.84
6 h	147.0	3.3	0.67	4.4	0.90
1 j	293.9	4.5	0.92	6.7	1.37
2 j	415.7	4.9	1.00	7.8	1.59
3 j	509.1	5.2	1.06	8.3	1.69
4 j	587.9	5.6	1.14	8.8	1.8
5 j	657.3	5.9	1.20	9.4	1.92
6 j	720.0	6.1	1.24	9.5	1.94
7 j	777.7	6.3	1.29	10.1	2.06
8 j	831.4	6.4	1.31	10.2	2.08

Tableau 3.12 : Valeurs moyennes d'absorption d'eau des deux bétons.

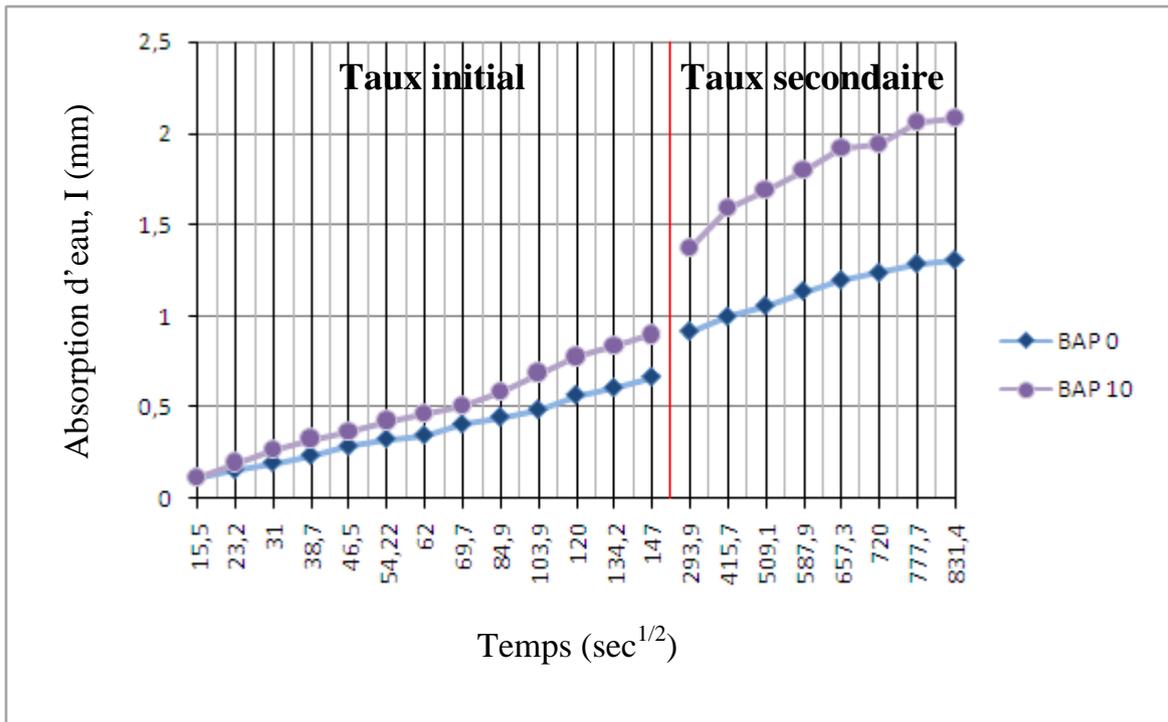


Figure 3.14 : Absorption d'eau capillaire en fonction du temps des deux bétons étudiés à 28 jours (E/L = 0.40).

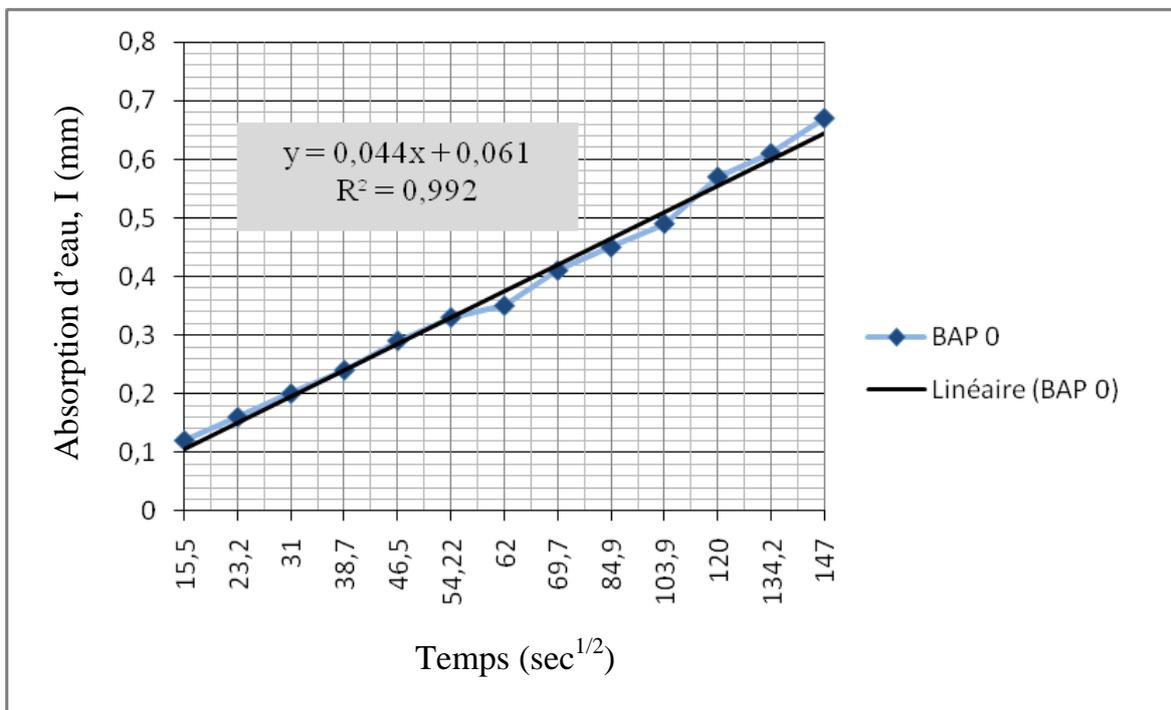


Figure 3.15 : Taux initial d'absorption d'eau en fonction du temps (BAP 0).

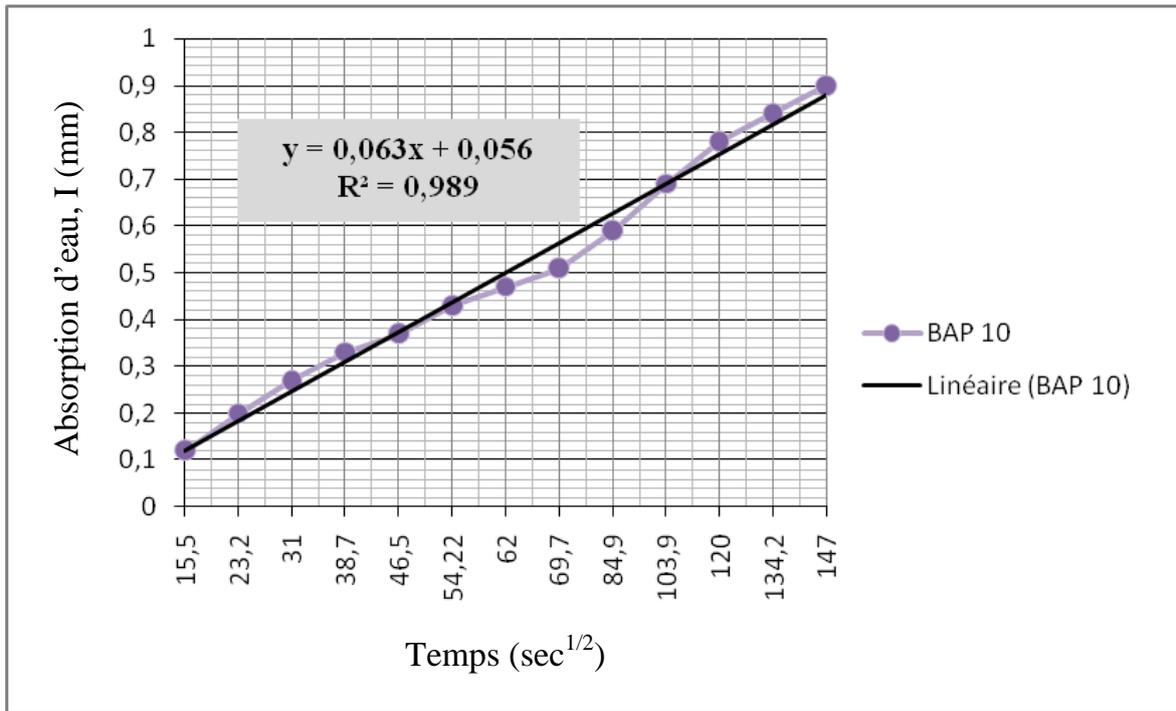


Figure 3.16 : Taux initial d'absorption d'eau en fonction du temps (BAP 10).

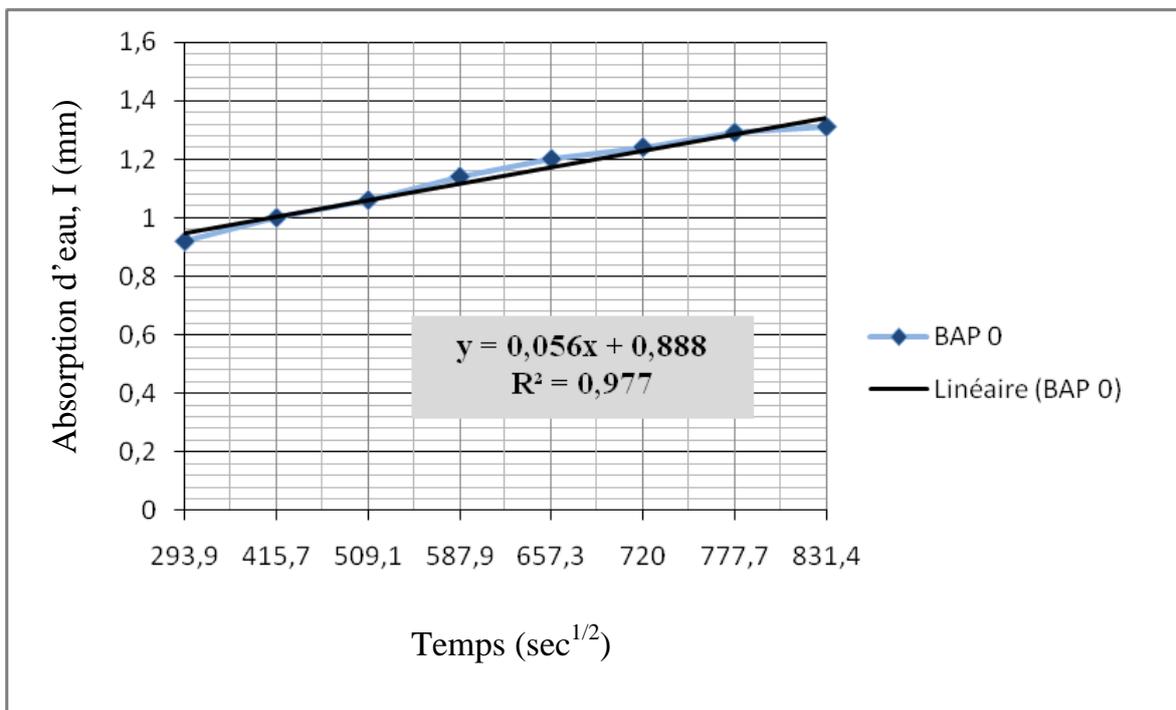


Figure 3.17 : Taux secondaire d'absorption d'eau en fonction du temps (BAP 0).

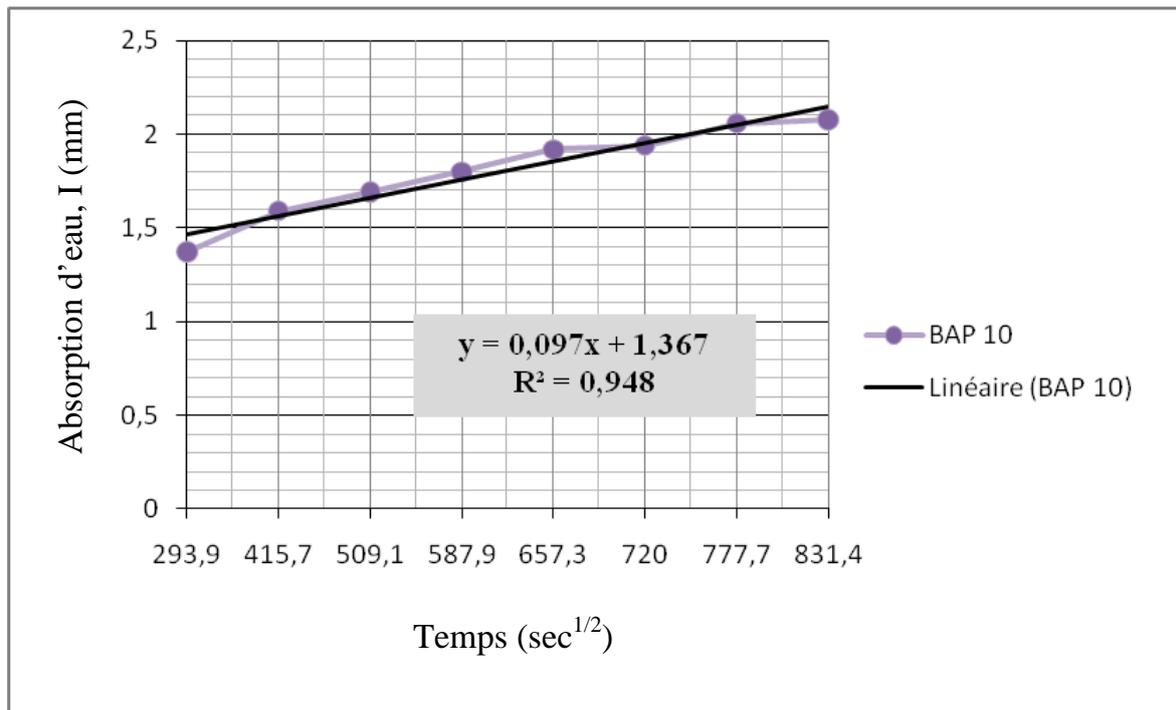


Figure 3.18 : Taux secondaire d'absorption d'eau en fonction du temps (BAP 10).

On peut remarquer des figures ci-dessus que le BAP 10 c'est-à-dire celui qui contient un taux de 10 % de la PZN a absorbée une quantité d'eau plus que celle absorbée par le BAP 0 (ne contient pas de la PZN) et cette différence n'est pas assez grande (0.77 mm), mais elle est notable en comparant le taux initial et le taux secondaire, car la plus grande quantité absorbé a été constaté durant le taux secondaire.

La différence d'absorption peut être expliqué par l'ajout de la PZN qui a comme rôle d'augmenté la viscosité du mélange se qui rend la structure de notre béton plus poreuse.

### 3.5 Conclusion

D'après les résultats expérimentaux obtenus dans ce chapitre on peut dire que le béton confectionné avec un ciment qui contient une substitution de 10% de la pouzzolane naturelle a donné des résultats acceptables, c'est-à-dire que notre béton auto plaçant est comparable au béton ordinaire, ce qui nous a permis de prouver qu'il est possible de fabriquer des BAP en utilisant des matériaux locaux.

La substitution du ciment par la pouzzolane naturelle Algérienne a modifié la performance du BAP à l'état frais et durci et un taux de remplacement de 10% de la pouzzolane naturel comme ajout semble optimale.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES**

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

Cette étude a été entreprise afin d'évaluer l'effet de l'ajout de la pouzzolane naturelle de beni-saf au ciment CPJ-CEM II/A 42.5 sur la durabilité des BAP, ainsi que la rhéologie des MAP et BAP.

A partir des résultats expérimentaux de notre étude, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- ✓ En utilisant des matériaux locaux on a pu confectionner un béton auto plaçant.
- ✓ Le dosage 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 rhéologie, la PZN diminue l'ouvrabilité (réduction du diamètre de la galette du béton durant l'essai d'étalement au cône).
- ✓ la PZN augmente la viscosité du mélange.
- ✓ une teneur en PZN de 10% peut donner un bon béton autoplaçant sans aucun signe de ressuage ni de ségrégation.
- ✓ Une diminution de la résistance mécanique en présence de la PZN, mais qui est rattrapée au delà de 28 jours.
- ✓ concernant les différentes propriétés de transfert (absorption capillaire, perméabilité à l'eau) pas de différence notable entre le BAP sans ajout et le BAP avec 10% de substitution de la PZN après 28 jours.

Actuellement, les BAP sont en utilisation croissante dans les constructions et les réparations en génie-civil, mais ils restent peu utilisés surtout en Algérie par rapport au BO ce qui nécessite de faire plus de recherche sur le BAP pour le rendre standard, par conséquent nous recommandons pour les futurs travaux ce qui suit :

- ✓ continuation dans le même sujet de durabilité avec d'autres essais sur la perméabilité au gaz ainsi que sur la diffusion des ions chlorures ou bien sur la carbonatation.
- ✓ varier la finesse de la PZN jusqu'à 4200 et 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$  qui est comparable à celle de ciment (4300  $\text{cm}^2/\text{g}$ ), et voir son comportement sur le BAP.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Okamura H., Ouchi M., « self-compacting concrete », journal of advanced concrete technology, vol 1, N° 1, pages 5-15, 2003.
- [2] Z. ABIB, « formulation et caractérisation des bétons autoplaçants », Thèse de Magister USTHB, 2004.
- [3] Projet national de recherche CERIB, « béton autoplaçant BAP », France, Octobre 2001.
- [4] GILLES Escadrilles, Responsable pédagogique, CARMEUSE France, « Formation continue actualisant » – 17 et 18 Octobre 2001.
- [5] livre de J.LUPO intitulé : « Les bétons aux nouvelles performances », chapitre 3, pages 110.
- [6] J.BARON et J-P.OLLIVIER, « Les bétons : bases et données pour leur formulation », Eyrolles, 1999.
- [7] MLADENKA SARIC-CONIC, « microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons », Université de Sherbrooke, 2002.
- [8] DOMONE P.L., « self-compacting concrete: an analysis of 11 years of case studies», cement & concrete composites, vol 28, pages 197-208, 2006.
- [9] J.Festa et G.Deux : « nouveau guide du béton et de ses constituent » 8<sup>eme</sup> édition (Eyrolles).
- [10] Article : « TIMBA solutions industrielles » Réf. FPQ03126 indice C du 04/12/2008.
- [11] Turcry P., « Retrait et fissuration des bétons autoplaçant influence de la formulation », thèse de doctorat, école centrale de Nantes et l'université de Nantes, 230 pages, 2004.
- [12] SERDAN T., « rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants ». Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 224 pages, 1999.
- [13] Khayat K.H., Ghezal A., Hadriche M.S., « Utility of statistical models in

- proportioning self-consolidating concrete », in proceedings of first international RILEM symposium of self-compacting concrete, RILEM, pages 345-359, 1999.
- [14] IREX, « La méthode MBE, projet national calibe », institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil, Paris, France, 34 pages, 2011. cite web : [www.irex.asso.fr](http://www.irex.asso.fr).
- [15] N. REBOUH, « Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants », projet de fin d'étude ENP, 2006.
- [16] C. HU, « Rhéologie des bétons fluides », études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA16, 203 pages, Paris, France, 1995.
- [17] CHOUINARD B., «étude des relations entre la rhéologie du béton et sa pompabilité », Mémoire pour l'obtention du grade de Maitre de Science (MSC), Département de Génie Civil, Université Laval, 1999.
- [18] KHAYAT K.H., « cours de technologie avancée du béton », Université de Sherbrooke, 305 pages.
- [19] VERRETTE J.L., « hydraulique des conduites », notes de cours, Département de Génie Civil, Université Laval, 1989.
- [20] DE LARRARD F., « structures granulaires et formation des bétons », études et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1999.
- [21] KHEIRA BELAID, « performances de divers types d'agents viscosants dans les bétons autoplaçants pour bâtiments, mémoire de maitrise en sciences appliquées », Département de Génie Civil Université de Sherbrooke, pages 6-10, Mai 2009.
- [22] SEDRAN THIERRY, « rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants », Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Mars 1999.
- [23] BOUKENDAKDJI O., journée d'étude sur les matériaux et les structures « Le béton autoplaçant : une solution pour le compactage du béton ».

- [25] Gibbs J.C., Zhu W., « strength of hardened self-compacting concrete », proceedings of first international RILEM symposium on self-compacting concrete (pro7), Stockholm, Suède, pages 199-209, 1999.
- [26] G. König, K. Holschemacher, F. Dehn, & D. Weibe. « Self-compacting concrete time development of material properties and bond behaviour », Proceeding of 3<sup>rd</sup> international RILEM symposium on self-compacting concrete (pro 33), Tokio, Japan, pages 507-516, 2001.
- [27] Y. Klug, K. Holschemacher. « Comparison of the hardened properties of self compacting concrete and normal vibrated concrete ». Proceeding of 3<sup>rd</sup> international RILEM symposium on self-compacting concrete (pro 33), Reykjavik, Iceland, pages 596-607, 2003.
- [28] A. Pineaud. « Contribution a l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants et application a l'industrie de la préfabrication », thèse de doctorat, université de Cergy-pontoise, page 271, 2007.
- [29] B. Persson. « A comparison between mechanical properties of Self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete ». Cement and concrete research, vol 31, N° 1 : pages 193-198, 2001.
- [30] G. Pons, E. Proust, & S. Assié. « Creep and shrinkage of self-compacting concrete : a different behaviour compared with vibrated concrete », Proceeding of 3<sup>rd</sup> international RILEM symposium on self-compacting concrete (pro 33), Reykjavik, Iceland : pages 645-654, 2003.
- [31] AFGC. Bétons autoplaçants - recommandations provisoires. Pages 63, 2000.
- [32] P. Turcry, E. Rozière, & A. Loukili. « Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait de fissuration des bétons autoplaçants », XXII<sup>ième</sup> rencontres universitaires de génie civil, Grenoble, France, 2005.
- [33] Favre R., Jaccoud J.P., Burdet O., Charif H., « Dimensionnement des structures en béton », presses polytechniques et universitaires Romandes, 3<sup>ème</sup> édition, vol 8, 612

- pages, 2004.
- [34] Assié S., Thèse de doctorat en Génie Civil, « Durabilité des bétons autoplaçants », Institut National des Sciences Appliqués de Toulouse, 254 pages, 2004.
- [35] Gilles Escadrilles, « Formation continue actualisante », Carmeuse, France, 2001.
- [36] Neville A.M., « Propriétés des Bétons », traduction CERIB, Sherbrooke, Canada, édition Eyrolles Paris, 2000.
- [37] Trägårdh J., « Microstructural features and related properties of self-compacting concrete », Proceeding of 1<sup>st</sup> international RILEM symposium on self-compacting concrete (pro 07), Stockholm, Suède : pages 175-186, 1999.
- [38] Zhu W., Bartos P. J. M., « Permeation properties of self-compacting concrete », cement and concrete research, vol 33, N° 06, pages 921-926, 2003.
- [39] Assié S., Escadeillas G., Waller V., « Estimates of self-compacting concrete 'potentiel' durability », construction and building materials, vol 21, N° 10, pages 1909-1917, 2007.
- [40] Yazici H., « The effect of silica fume and high-volume class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze thaw resistance of self-compacting concrete », construction and building materials, vol 22, N° 4, pages 456-462, 2008.
- [41] Sakata K., « durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete », CONSEC 98, International Conference 2, pages 2057-2064, Tronso, GB, 1998.
- [42] Audenaert K., De Schutter G., « Influence of moisture on the carbonation of self-compacting concrete », Proceedings (SP 212) of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Greece, pages 451-465, 2003.
- [43] BOEL V., AUDENAERT K., DE SCHUTTER G., « Pore structure of self-compacting concrete », First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, pages 837-843, 2002.
- [44] ZHU W., QUINN J., BARTOS P.J.M., « Transport properties and durability of self-

- compacting concrete », Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pages 451-458, 2001.
- [45] TANG L., ANDALEN A., JOHANSSON J.O. & HJELM S., « Chloride diffusivity of self-compacting concrete », Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pages 187-198, 1999.
- [46] ROUGEAU P., MAILLARD J.L. & MARY-DIPPE C., « Comparative study on properties of self-compacting concrete and high performance concrete used in precast construction », Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pages 251-261, 1999.
- [47] AUDENAERT K., DE SCHUTTER G., « Chloride penetration in self-compacting concrete », Proceedings of 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pages 818-825, 2003.
- [48] ALLALI MOHAMED EL AMINE, « Formulation et propriétés rhéologiques des BAP à base d'un ciment à la pouzzolane naturelle » thèse de magister, université de BLIDA, 144 pages, 2011.
- [49] BOUKENDAKDJI OTHMANE, « Étude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires », Thèse de Doctorat d'état, Université Blida, Algérie, 199 pages, 2010.
- [50] Domone P.L.J. & Jin J., « Properties of mortar for self-compacting concrete », proceedings of RILEM international Symposium on self-compacting concrete, Stockholm, RILEM proceedings PRO 7, Paris, pages 109-120, 1999.
- [51] BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC, « The european guidelines for self-compacting concrete », may 2005.
- [52] Schutter G.D., « Guidelines for testing fresh self-compacting concrete », european reserch project, 24 pages, september 2005.
- Available in: [www.cege.ucl.ac.uk/research/concrete/Testing-SCC](http://www.cege.ucl.ac.uk/research/concrete/Testing-SCC).
- [53] DOMONE P., « The slump flow test for high-workability concrete », cement and concrete research, vol 28, N°2, pages 177-182, 1998.

- [54] EFNARC, « specification and guidelines for SCC », ISBN 09539733 4 4, 32 pages, 2002.
- [55] Association Française de Génie Civil (AFGC), 2002, « bétons autoplaçants – recommandations provisoires », annals du bâtiment et des travaux publics.
- [56] BETHMONT S., « mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 159 pages, 2005.
- [57] Turanli L., Uzal B., Bektas F., « effet of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements », cement and concrete research, Vol 35, N°6, pages 1106-1111, 2005.
- [58] KAID N., CYR M., KHELAFI H., GOUFI N., « Caractérisatiques mécaniques de bétons contenant une pouzzolane naturelle face aux attaques a l'eau de mer et aux sulfates », SBEIDCO- 1<sup>st</sup> international conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries ENSET Oran (Algeria), pages 43-50, October 2009.
- [59] IBRAHIM 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, pages 2378-2383, 2007.
- [60] UYSAL M., SUMER M., « Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures », Construction and Building Materials, Vol 25, N° 11, pages 4112-4120, 2011.
- [61] DIAMANTONIS N., MARINOS I., KATSIOTIS M.S., SAKELLARIOU A., PAPATHANASIOU A., KALOIDAS 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, pages 1518-1522, 2010.
- [62] SONEBI M., GRÜNEWALD S., & WALRAVEN J., « Filling ability and passing ability of self-compacting concrete », ACI Materials Journal, pages 162-170, 2007.

- [63] BORSOI A., COLLEPARDI M., COLLEPARDI S., TROLI R., & ZANARDI L., « Low-Heat, High-Strength, Durable Self-Consolidating Concretes », 9<sup>th</sup> CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Watsaw, Poland, pages 399-409, 2007.
- [64] LIU M., « Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash », Construction and Building Materials, Vol 24, N° 7, pages 1245-1252, 2010.
- [65] 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, Vol 59, N° 7, pages 517-528, 2007.
- [66] BARBHUIYA S., « Effects of fly ash and dolomite powder on the properties of self-compacting concrete », Construction and Building Materials, Vol 25, N° 8, pages 3301-3305, 2011.
- [67] KRACHAÏ R.M, BPUABDELLAH M.A, ABDELHADI H, HAMOU K., « Influence de la pouzzolane de beni-saf sur les performances mécaniques des bétons autoplaçants », SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) – October 12- 14, 2009.
- [68] ADAM N. VILLE, « Propriétés des bétons », traduit par le CRIB (Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, SHERBROOKE-LAVAL), septembre 2000.
- [69] PAYA J., MONZO J., BORRACHERO M.V., PERIS E., AND GONZALEZ-LOPEZ E, « Mechanical treatment of fly ashes, Part III »: Study of strength development of ground fly ashes (GFA) - cement mortars, Cement and Concrete Research, Vol 27, 1997.
- [70] M. GHRICI, S.KENAI, M. SAID MANSOUR ET E. MEZIANE, 2005 « Performances de ciment à base de la pouzzolane naturelle de Beni-saf », Congrès international Réhabilitation des constructions et développement durable, Alger, PP 108- 115, 3 et 4 mai 2005.

**ANNEXE A**

**EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU  
MORTIER**

## ANNEXE A

### EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DE MORTIER

#### 1. Les données

- Pour un volume du mortier de  $V=1.8$  l (par exemple).
- Les masses volumiques absolues des constituants :
  - Ciment :  $\rho_C=3040$  kg/m<sup>3</sup>
  - Sable :  $\rho_S=2584$  kg/m<sup>3</sup>
  - Superplastifiant :  $\rho_{Sp}=1070$  kg/m<sup>3</sup>
  - Eau :  $\rho_E=1000$  kg/m<sup>3</sup>
- Coefficient d'absorption du sable  $A_b=0.64$  %.
- On fixe le rapport Sable/Mortier  $S/M = 0.50$  (Par exemple).
- On fixe le rapport (par poids)  $E/C = 0.40$  ou (par volume)  $E/C = 1.216$ .
- Le superplastifiant (MEDAFOW 30) il est de 30% extrait (il contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : %  $Sp=1.8$  % du poids de ciment (ou poudre).

#### 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 minute puis on le pèse une deuxième fois on obtient une masse  $M_2 = 293.9$  gr et on calcul l'humidité du sable ( $\mu_s$ ):

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

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

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

### **3. Calcul des quantités de chaque constituant**

#### **3.1. Le ciment**

- Le pourcentage en volume du ciment (%C) :

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

- La quantité de ciment (C) en kg :

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

#### **3.2. Le Sable**

- La quantité du sable en kg (S) :

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

#### **3.3. Le superplastifiant**

- La quantité du superplastifiant (Sp) :

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

#### **3.4. L'eau**

L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties une première partie E<sub>1</sub>, qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E<sub>2</sub> (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 (%  $E_{vol}$ ) :

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

- 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                       $E_2 = E \times 0.30$

## **ANNEXE B**

# **EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON**

## ANNEXE B

### EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DE BÉTON

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

#### 1. Les données

- Pour un volume de béton de  $V=30$  litres (par exemple).
- Masses volumiques :
  - Masse volumique apparente du gravier :  $\rho_G = 1486 \text{ kg/m}^3$
  - Masse volumique absolue du gravier :  $\rho_{AG} = 2705 \text{ kg/m}^3$
  - Masse volumique absolue du sable :  $\rho_S = 2584 \text{ kg/m}^3$
  - Masse volumique absolue du ciment :  $\rho_C = 3040 \text{ kg/m}^3$
- Coefficients d'absorption :
  - Coefficient d'absorption du sable :  $A_{bS} = 0.64$
  - Coefficient d'absorption du gravier :  $A_{bG} = 0.58$
- Le rapport Sable/Mortier :  $S/M = 0.40$
- 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  $E/C_{\text{volume}} = 1.217$  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) : %S<sub>p</sub>= 1.8% du poids de ciment, le MEDAFLOW30 est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau).

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

## **3. Calcul des différents composants**

### **3.1. Gravier**

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

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

### **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 dans le béton :

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

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

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

- Le pourcentage du sable 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

### **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 :

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

### 3.4. Superplastifiant

- Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton  $S_p$  (kg/m<sup>3</sup>) :

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

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

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

### 3.5 Eau

L'eau ajoutée au béton (E) est divisée en deux parties : la première partie (E<sub>1</sub>) est de 70% de (E) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (E<sub>2</sub>), 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<sub>1</sub>) :

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

- L'eau contenue dans le gravier (e<sub>2</sub>) :

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

➤ 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 :

$$\underline{\text{Eau1}} \quad E_1(kg) = 0.70 \times E$$

$$\underline{\text{Eau2}} \quad E_2(kg) = 0.30 \times E$$