

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene**  
**FACULTE DE GENIE CIVIL**



**THESE**

**Présentée pour l'obtention du grade de Docteur**

**En : GENIE CIVIL**

**Spécialité : Construction**

**Par : Zine eddine ABIB**

**THEME**

**Influence des fines issues d'argile kaolinitique  
cuite sur les performances des bétons  
autoplaçants**

Soutenue publiquement, le : 08 Mai 2014,

Devant le jury composé de :

M. M. CHEMROUK	Professeur, à l'USTHB	Président
Mme. F. KHARCHI	Professeur, à l'USTHB	Directrice de Thèse
M. M.N. OUDJIT	Professeur, à l'USTHB	Examineur
M. S. HADDADI	Professeur, à l'USTHB	Examineur
M. A. BALI	Professeur, à l'ENP / Alger	Examineur

# Dédicace

**Je dédie cette thèse à mon défunt père ABIB Ahmed qui a été le premier à m'encourager à aller si loin dans les études. Il m'a inculqué le goût du travail, de la rigueur et de l'ambition. Parce que tu m'avais toujours soutenu, même au plus fort de ta maladie, j'ai voulu le mener à terme pour que tu sois fier de moi. Merci pour tout.**

# Remerciement

*Je tiens à remercier en premier lieu DIEU le miséricordieux qui m'a donné la force et la volonté d'achever ce modeste travail.*

*Mes sincères remerciements vont à M<sup>me</sup> F.KHARCHI qui a bien voulu diriger les travaux de cette thèse. Sa gentillesse, ses précieux conseils, et son aide inestimable. Qu'elle trouve ici l'expression de mon respect.*

*Je voudrais remercier M<sup>r</sup> M. CHEMROUK, professeur à l'USTHB, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury, qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect*

*Mes remerciements vont à M<sup>r</sup> A. BALI, professeur à l'ENP/Alger, M<sup>r</sup> S. HADDADI, professeur à l'USTHB et M<sup>r</sup> M. N. OUDJIT, professeur à l'USTHB; qui ont bien voulu faire partie du jury et d'apporter leur vive contribution à l'enrichissement de ce travail.*

*Mes vifs remerciements à mon épouse, pour son aide inestimable, et sa compréhension. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde admiration.*

*Un amical remerciement est également adressé à mes amis du CNERIB, CETIM, LAFARGE et de la FGC/USTHB en particulier Karima Arroudj.*

*Je remercie tout ceux et toutes celles qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

# Résumé

La technologie des bétons a connu un développement important ces dernières années grâce à l'utilisation des superplastifiants et la disponibilité des additions minérales.

Parmi les matériaux les plus récents utilisés, comme additions en remplacement d'une partie du ciment dans les bétons, sont les fines d'argile cuite aux températures de 800°C et 900°C. Ce travail de recherche se base sur des essais expérimentaux qui ont confirmé la pouzzolanité des fines issues d'argile cuite, ainsi que leur influence sur le comportement rhéologique et mécanique des bétons autoplacants (BAP).

Les essais expérimentaux montrent que l'ajout de 5% de déchet de brique broyée a permis, non seulement, d'améliorer les résistances mécaniques, mais aussi de favoriser un meilleur comportement rhéologique en matière de fluidité et de stabilité par rapport au témoin.

Cependant, les essais d'optimisation de la teneur du béton autoplacant en gros granulat, sable et pâte, nous ont conduit à confirmer que la combinaison massique la plus optimale (meilleure ouvrabilité et stabilité) est celle qui se base sur un faible rapport volumique sable/pâte avec un squelette granulaire plus riche en gravillons de faible dimensions (2/3 de G3/8 et 1/3 de G8/15).

**Mots clés :** Déchet de brique broyée, argile cuite, pouzzolanité, chaleur d'hydratation, béton autoplacant, ouvrabilité, résistance mécanique, retrait.

# ملخص

عرفت تكنولوجيا الخرسانة تطوراً معتبراً خلال السنوات الأخيرة بفضل استخدام الإضافات الكيميائية وتوفير الإضافات المعدنية.

كما تعتبر الحبيبات الطينية المعالجة حرارياً ما بين 800°م و900°م إحدى المواد المستخدمة مؤخراً كإضافة معدنية تسمح بتعويض جزئي للإسمنت.

يعتمد هذا البحث على التجارب المخبرية و التي أكدت بوزولانية الحبيبات الطينية المعالجة حرارياً، و مدى تأثيرها على الخصائص الريولوجية و الميكانيكية للخرسانات المرصوفة ذاتياً.

إن إضافة 5% من طحين ركام الأجر سمح ليس فقط بتحسين المقامات الميكانيكية (الضغط والتشد)، لكن تحقيق أفضل سلوك ريولوجي من حيث السيولة والإستقرار مقارنة بالشاهد.

بينما تجارب ضبط نسبة الحصى الكبرى، الرمل، المونة في الخرسانات المرصوفة ذاتياً أكدت أن التركيبة الأكثر ملاءمة (أحسن سيولة وإستقرار) هي التي تحتوي على أصغر نسبة حجمية رمل/مونة مع الهيكل الحصى الأغنى من

حيث الحصى الصغيرة (3/2 من حصى 8/3 و 3/1 من حصى 15/8).

**كلمات مفتاحية:** طحين ركام الأجر، صلصال، الحبيبات الطينية المعالجة حرارياً، قابلية التشغيل، الخرسانات المرصوفة ذاتياً حرارة، التمييه، إنكماش.

# Abstract

The technology of concrete has significantly improved in recent years through the use of superplasticizer and availability of mineral additions.

One of the most recent materials used as an additive, replacing a portion of cement in concrete, is fine clay burnt at a temperature of 800°C to 900°C. This research is based on trials that complied with artificial pozzolan (waste crushed brick), and their effect on the rheological and mechanical behaviour of mortar.

The addition of 5% of a waste crushed brick has helped, not only to improve the strength (tensile and compression), but also to foster a better rheological behaviour in terms of fluidity and stability, with a low heat of hydration compared to the control specimen.

However, tests of optimizing the content of self-compacting concrete (SCC) in coarse aggregates, sand and binder, led us to confirm that the optimal mix design (better workability and stability) is that based on a lower volumetric sand/paste ratio with a granular skeleton richest in gravels having smaller dimensions (2/3 of G 3/8 and 1/3 of G 8/15).

**Keywords:** Waste crushed brick; Pozzolanic activity; Heat of hydration; Workability; Strength; Self Compacting Concrete, Shrinkage.

# Sommaire

Résumé	1
Sommaire	4
Liste des figures	9
Liste des tableaux	12
Abréviations et symboles	14
Introduction générale	16
Problématique	17
Objectifs de la recherche	20
Plan de travail	20

## CHAPITRE I : CIMENTS ET AJOUTS - GENERALITES

I.1. Introduction	23
I.2. Ciment portland	23
I.3. Fabrication du ciment	25
I.4. Composition du ciment	26
I.4.1. Le clinker	26
I.4.2. Le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	28
I.5. Hydratation du ciment Portland	29
I.5.1. Mécanisme d'hydratation du ciment	29
I.5.2. Chaleur d'hydratation	32
I.6. Caractéristiques du ciment portland	34
I.6.1. Temps de prise	34
I.6.2. Durcissement	34
I.6.3. Finesse de mouture d'un ciment	36
I.6.4. Retrait	37
I.6.5. Caractéristiques mécaniques	38
I.7. Les principales catégories de ciment	38
I.7.1. Classification des ciments en fonction de leur composition	38
I.7.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance	39
I.8. Ajouts cimentaires	40
I.8.1. Réactivité des ajouts pouzzolaniques	40
I.8.2. Fumée de silice	40

I.8.3. Laitier vitrifié de haut fourneau	41
I.8.4. Cendres volantes	42
I.8.5. Fines calcaires	42
I.8.6. Sable de dune broyé	43

## **CHAPITRE II : BETON AUTOPLAÇANT - ETAT DE CONNAISSANCES**

I.1. Introduction	46
II.2. Définition du béton autoplaçant	46
II.3. Historique des bétons autoplaçants	47
II.4. Spécificités de la composition des BAP	48
II.5. Matières premières utilisées dans les BAP	49
II.5.1. Liants et granulats	49
II.5.2. Adjuvants des bétons	50
II.5.2.1. Superplastifiant	51
II.5.2.2. Agent de viscosité	54
II.6. Propriétés recherchées des bétons autoplaçants	56
II.6.1. Notion de déformabilité et de capacité de remplissage	56
II.6.2. Fluidité	59
II.6.2.1. Essai d'étalement	59
II.6.2.2. Viscosité plastique et temps d'étalement à 500 mm	60
II.6.2.3. Essai de la table de fluidité	61
II.6.2.4. Essai de la boîte en L	61
II.6.2.5 Essai du Box	62
II.6.3. Stabilité	62
II.6.3.1 Essai de l'entonnoir en forme de V	62
II.6.3.2. Essai de tassement	63
II.6.4. Ségrégation dynamique	64
II.6.4.1 Essai du tube en U	64
II.6.4.2. Essai de la capacité de remplissage (Essai du caisson)	64
II.6.4.3. Essai de stabilité au tamis	65
II.6.5. Ségrégation statique	67
II.7. Optimisation des BAP	68
II.7.1. Optimisation de la teneur en gros granulats	68
II.7.2. Optimisation des teneurs en ajouts minéraux	69

II.7.3. Optimisation des teneurs en ajouts chimiques	72
II.8. Méthodes de formulation	73
II.8.1. Approche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées	77
II.8.2. L'Approche Japonaise	79
II.9. Performances mécaniques	80
II.10. Exemples de formulation	83
II.11. Retrait des BAP	85
II.11.1. Retrait endogène	86
II.11.2. Retrait de séchage	87
II.12. Fluage	88
II.13. Résistance des BAP à la migration d'éléments extérieurs	89
II.13.1. Migration des chlorures	89
II.13.2. Carbonatation	89
II.14. Module instantané des BAP	89
II.15. Fabrication des BAP	90
II.16. Précautions pour la mise en oeuvre des BAP	91
II.16.1. Mise en place des BAP	91
II.16.2. Coffrages des structures en BAP	92
II.16.3. La cure des BAP	93
II.17. Domaine d'application des BAP	94
II.18. Impact socio-économique de l'utilisation des BAP	95
II.19. Conclusion	96

### **CHAPITRE III : ARGILES CUITES DANS LE BETON - ETAT DE CONNAISSANCES**

III.1. Introduction	99
III.2. Déchets de brique dans les bétons	100
III.3. Métakaolin	102
III.3.1. La calcination du kaolin	103
III.3.2. Analyse chimiques du métakaolin	104
III.3.3. Caractérisation du Kaolin (gisement Tamazert -El Milia – Algérie)	105

## **CHAPITRE IV : ETUDE EXPÉRIMENTALE – ESSAIS ET MATERIAUX UTILISES**

IV.1. Introduction	108
IV.2 Techniques et essais	110
IV.2.1. Analyse chimique, minéralogique et thermique	110
IV.2.1.1. Analyse chimique	110
IV.2.1.2. Analyse minéralogique avec la diffraction aux rayons X (DRX)	110
IV.2.1.3. Essais d'identification des propriétés à la cuisson	110
IV.2.2. Mesure de Chaleur d'hydratation	110
IV.2.3. Optimisation de la pâte liante (Méthode des coulis)	112
IV.2.4. Essais sur mortiers : Mesure des résistances mécaniques	113
IV.2.5. Essais sur granulats	114
IV.2.5.1. Essai d'équivalent de sable (NF P 18-598)	114
IV.2.5.2. Module de finesse (NF P 18-304)	114
IV.2.5.3. Masses volumiques	114
IV.2.5.4. Essai Los Angeles (NF P 18-573)	115
IV.2.6. Essais sur béton frais	115
IV.2.6.1. Mesure de l'affaissement (NF P 18-415)	115
IV.2.6.2. Mesure de l'étalement	115
IV.2.6.3. Viscosité plastique et temps d'étalement à 500 mm	116
IV.2.6.4. Essai de stabilité au tamis	114
IV.2.7. Essais sur béton durci	117
IV.2.7.1 Essai de compression	117
IV.2.7.2. Essai de traction par fendage	117
IV.2.7.3. Porosité totale	118
IV.2.7.4. Absorption capillaire	118
IV.2.7.5. Auscultation dynamique (Ultrason)	119
IV.2.7.6. Essai de retrait	120
IV.3. Caractérisation des matériaux	122
IV.3.1. Analyse du cru d'argile et de déchet de brique broyée	122
IV.3.1.1. Analyse du cru d'argile	122
IV.3.1.1.1. Analyse chimique	122
IV.3.1.1.2. Analyse granulométrique	122
IV.3.1.1.3. Etude du cycle de séchage	123

IV.3.1.1.4. Propriétés à la cuisson	123
IV.3.1.2. Analyse du déchet de briques broyées (DBB)	123
IV.3.1.2.1. Analyse chimique du DBB	123
IV.3.1.2.2. Analyse minéralogique du DBB	123
IV.3.2. Ciment	124
IV.3.3. Fumée de silice	125
IV.3.4. Laitier du haut fourneau	127
IV.3.5. Superplastifiant	128
IV.3.6. Sable et Gravier	128
IV.3.7. Formulation et caractérisation du béton ordinaire (témoin)	129

## **CHAPITRE V : ETUDE EXPERIMENTALE - RESULTATS ET DISCUSSIONS**

VI.1. Introduction	133
VI.2. Optimisation de la teneur en DBB	133
VI.3. Mesure de la chaleur d'hydratation	135
VI.4. Optimisation de la pâte liante	136
VI.5. Optimisation du squelette granulaire d'un BAP au DBB	138
VI.6. Effet de la variation du rapport E/L sur la maniabilité des BAP	142
VI.7. Optimisation de la teneur en ajout chimique	144
VI.7.1. Effet de la variation de la teneur en SP sur la maniabilité des BAP	144
VI.7.2. Effet de la variation de la teneur en agent colloïdal sur la maniabilité et la stabilité des BAP	146
VI.8. Performances rhéologiques et mécaniques	148
VI.8.1. Caractéristiques rhéologiques	148
VI.8.2. Caractéristiques mécaniques	150
VI.9. Porosité totale et absorption capillaire	152
VI.10. Auscultation dynamique	153
VI.11. Etude de retrait	154
VI.11.1. Retrait endogène	154
VI.11.2. Retrait total	155
VI.11.3. Retrait de séchage	155
Conclusion générale - Recommandations et perspectives	158
Références bibliographiques	164

# LISTE DES FIGURES

Figure I.1 - Présentation schématique de la pâte de ciment hydraté	25
Figure I.2 - Vue au microscope optique des minéraux du clinker	27
Figure I.3 - Influence du rapport aluminat/sulfate sur la prise	29
Figure I.4 - Représentation schématique d'une courbe calorimétrique lors de l'hydratation d'une pâte de ciment	31
Figure I.5 - Evolution de la quantité de chaleur dégagée durant les 3 premiers jours d'hydratation	33
Figure I.6 - Evolution du flux de chaleur dégagée durant les trois premiers jours d'hydratation	33
Figure I.7 - Evolution physico-chimique de la pâte de ciment	35
Figure I.8 - Diffractogramme X du sable de dune broyé	44
Figure I.9 - Vue par MEB des particules du sable de dune broyé	44
Figure II.1 - Défloculation des grains de ciment en présence d'un superplastifiant	50
Figure II.2 - Comportement rhéologique de coulis à faibles rapports E/C en présence d'un superplastifiant	53
Figure II.3 - Essai de la boîte, capacité de remplissage	57
Figure II.4 - Variation du volume de béton passant en fonction de l'affaissement	57
Figure II.5 - Capacité de remplissage ou déformabilité maximale	58
Figure II.6 - Variation de la demande en sable en fonction du rapport E/L	59
Figure II.7 - Essai de la boîte en L	61
Figure II.8 - Essai de Box	62
Figure II.9 - Essai de l'entonnoir en forme V	62
Figure II.10 - Essai du tassement	63
Figure II.11 - Essai du tube en U	64
Figure II.12 - Essai du caisson	65
Figure II.13 - Influence du dosage en addition sur la stabilité au tamis des BAP	66
Figure II.14 - Effet de la variation du rapport sable/pâte sur la résistance à la ségrégation	66
Figure II.15 - Essai à la bille	67
Figure II.16 - Interaction entre particules dans un empilement	74

Figure II.17 - Optimum de compacité d'un mélange binaire	74
Figure II.18 - Mécanismes de dissipation lors de l'écoulement	75
Figure II.19 - Variation des résistances mécaniques en compression de BAP en fonction de la composition du liant	81
Figure II.20 - Évolution de la résistance à la compression en fonction du temps	82
Figure II.21 - Évolution de la résistance à la traction par fendage en fonction du temps	83
Figure II.22 - Comparaison des retraits endogènes d'un BO et de cinq BAP	87
Figure II.23 - Comparaison des retraits de séchage d'un BO et de cinq BAP	87
Figure II.24 - Comparaison des pertes d'eau d'un BO et de cinq BAP	88
Figure IV. 1- Bouteille de Cleret De Langavant	112
Figure IV.2 - Machine d'essai de compression et de flexion des mortiers	114
Figure IV.3 - Essai d'étalement au cône d'Abrams	115
Figure IV.4 - Stabilité au tamis	117
Figure IV.5 - Essai de retrait	121
Figure IV.6- Diffraction de la DBB aux rayons X	124
Figure IV.7 - Analyse minéralogique du ciment par DRX	125
Figure IV.8 - Analyse minéralogique de la fumée de silice par DRX	126
Figure IV.9 - Photo microscopique (MEB) de fumée de silice	126
Figure IV.10 - Analyse minéralogique du laitier du haut fourneau par DRX	127
Figure IV.11 - Photo microscopique (MEB) du laitier broyé (El Hadjar)	128
Figure IV.12 - Analyse granulométrique des fractions granulaires	129
Figure V.1 - Influence de la teneur en DBB sur l'évolution de la résistance à la flexion d'un mortier	134
Figure V.2 - Influence de la teneur en DBB sur l'évolution de la résistance à la compression d'un mortier	135
Figure V.3 - Effet de la DBB sur l'évolution de la chaleur d'hydratation	136
Figure V.4 - Influence de l'ajout de 5% de DBB sur la variation du temps d'écoulement d'un coulis de ciment en fonction du dosage en SP	137
Figure V.5 - Effet de la teneur en gros granulats et du rapport sable/pâte sur le diamètre d'étalement du béton	140
Figure V.6 - Effet de la variation du rapport E/L sur le diamètre d'étalement	143
Figure V.7 - Effet de la variation du rapport E/L sur la résistance à la compression au 28 <sup>ème</sup> jours d'âge	143

Figure V.8 - Variation du diamètre d'étalement d'un BAP en fonction de la teneur en SP	145
Figure V.9 - Effet de la variation de l'agent colloïdale sur le diamètre d'étalement d'un BAP	146
Figure V.10 - Effet de la variation de la teneur en agent colloïdal sur la résistance à la ségrégation	147
Figure V.11 - Effet de l'ajout de la DBB sur la viscosité plastique d'un BAP	149
Figure V.12 - Effet de la DBB sur la stabilité du BAP	149
Figure V.13 - Comparaison entre l'évolution de la résistance à la compression d'un BAP aux DBB et celle d'un BAP aux FS	150
Figure V.14 - Comparaison entre l'évolution de la résistance à la traction par fendage d'un BAP aux DBB et celle d'un BAP aux FS	151
Figure V.15 - Évolution du poids d'eau absorbée en fonction du temps	152
Figure V.16 - Évolution du retrait endogène des BAP et celui d'un BO	154
Figure V.17 - Évolution du retrait total des BAP et celui d'un BO	155
Figure V.18 - Évolution du retrait de séchage des BAP et celui d'un BO	156
Figure V.19 - Évolution de la perte d'eau des BAP et celle d'un BO	156

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Désignation des ciments selon la NA 442	39
Tableau I.2 : Classe de résistance des ciments selon la NA 442	39
Tableau II.1 : Corrélation entre le slump flow et le flow table sans choc	60
Tableau II.2 : Valeurs préconisées par les normes	60
Tableau II.3 : Compositions massiques des BAP et d'un béton ordinaire	82
Tableau II.4 : caractéristiques rhéologiques des BAP	82
Tableau II.5 : Différentes formulations de BAP	83
Tableau II.6 : Formulations de BAP et bétons ordinaires vibrés, réalisés et caractérisés par Persson	84
Tableau II.7 : Exemple de formulation des BAP fabriqués en France	84
Tableau II.8 : Essais de carbonatation accélérée sur un BAP et un BO	89
Tableau II.9 : Classification des BAP selon leur application	92
Tableau III.1 : composition chimique du MK	105
Tableau III.2: Analyse chimique d'un Kaolin Algérien	105
Tableau III.3 : Analyse minéralogique d'un Kaolin Algérien	106
Tableau IV.1 : Analyse chimique du cru d'argile	122
Tableau IV.2 : Analyse granulométrique (Fractions - Grossières)	122
Tableau IV.3 : Analyse granulométrique (Fractions - Fines)	122
Tableau IV.4 : Cycle de séchage du cru d'argile	123
Tableau IV.5 : Caractérisation du cru d'argile à la cuisson	123
Tableau IV.6: Analyse chimique du déchet de briques broyées	123
Tableau IV.7 : Composition chimique et minéralogique du ciment	125
Tableau IV.8 : Analyse chimique de la fumée de silice	126
Tableau IV.9 : Analyse chimique du laitier	127
Tableau IV.10 : Propriétés des granulats	129
Tableau IV.11 : Composition massique du béton ordinaire	130
Tableau IV.12 : Caractéristiques à l'état frais du BO	131
Tableau IV.13 : Caractéristiques à l'état durci du BO	131
Tableau V.1 : composition des mortiers	134
Tableau V.2 : Indices d'activité pouzzolanique	135
Tableau V.3 : Formulations des différentes variantes de BAP	139

Tableau V.4: Effet de la teneur en gros granulats et du rapport sable/pâte sur le diamètre d'étalement du béton, avec un rapport E/L = 0.4	140
Tableau V.5 : Effet de la variation du rapport E/L sur la maniabilité et la résistance à la compression	142
Tableau V.6 : Effet de la variation de la teneur en SP sur les caractéristiques du béton à l'état frais et la résistance à la compression	145
Tableau V.7 : Effet de la variation de la teneur en agent colloïdal sur les caractéristiques des BAP à l'état frais	146
Tableau V.8 : Compositions des BAP	148
Tableau V.9: Caractéristiques des bétons à l'état frais	149
Tableau V.10 : Comparaison des valeurs d'absorption capillaire et de porosité totale des BAP avec celles d'un BO	152
Tableau V.11 : Module d'élasticité dynamique par l'ultrason	153

# ABREVIATIONS ET SYMBOLES

<b>BAP</b>	Béton Autoplaçant
<b>BAN</b>	Béton Autonivelant
<b>DBB</b>	Déchet de Brique Broyée
<b>MK</b>	Métakaolin
<b>SCC</b>	Self Compacting Concrete
<b>S/P</b>	Rapport volumique Sable/Pâte
<b>E/C</b>	Rapport massique Eau /Ciment
<b>E/L</b>	Rapport massique Eau /Liant
<b>ES</b>	Label du ciment résistant aux sulfates (Eaux Sulfatées)
<b>DRX</b>	Diffraction aux rayons X
<b>MEB</b>	Microscope Electronique à Balayage
<b>PNS</b>	Copolymère formaldéhyde Naphtalène Sulfonate
<b>PMS</b>	Copolymère formaldéhyde Mélamine Sulfonate
<b>PA</b>	Polymère avec fonction Acrylate,
<b>PCE</b>	Polymère avec des fonctions Carboxylate,
<b>MPC</b>	Monomère avec les fonctions Phosphonate et/ou Carboxylate
<b>T<sub>500</sub></b>	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 500 mm
<b>NA</b>	Norme Algérienne
<b>EN</b>	Norme Européenne
<b>SR</b>	Ségrégation Ratio (taux de ségrégation)
<b>SF</b>	Slump Flow (Etalement)
<b>LCPC</b>	Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées
<b>BAP HP</b>	Béton Autoplaçant à Haute Performance
<b>BO</b>	Béton Ordinaire
<b>C</b>	Ciment
<b>CV</b>	Cendre volante
<b>CPA-CEM I 42.5</b>	Ciment Portland-résistance caractéristique minimale à 28 jours à la compression de 42.5 MPa
<b><math>\rho</math></b>	Masse volumique du béton
<b>G<sub>vo</sub></b>	Proportion volumique de gros granulats
<b>ES</b>	Equivalent de Sable
<b>LA</b>	Los Angeles

<b>SP</b>	Superplastifiant
<b>T (°C)</b>	Température
<b>PAF</b>	Perte au feu
<b>R.C (%)</b>	Retrait à la cuisson
<b>Abs (%)</b>	Taux d'absorption
<b>P.V</b>	Perte de volume
<b>RM/f</b>	Résistance mécanique à la flexion
<b>S</b>	Sable
<b>t</b>	Temps d'écoulement à l'entonnoir exprimé en secondes
<b>T (%)</b>	Tassement relatif
<b>T<sub>h</sub></b>	Valeur maximale du tassement
<b>σ</b>	Contrainte de compression
<b>C = CaO</b>	Chaux
<b>S = SiO<sub>2</sub></b>	Silice
<b>H = H<sub>2</sub>O</b>	Eau
<b>Ĉ = CO<sub>2</sub></b>	Gaz carbonique
<b>A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Alumine
<b>F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Hematite
<b>Ŝ = SO<sub>3</sub></b>	sulfate
<b>C-S-H</b>	Silicates de calcium hydratés
<b>CH</b>	Potlandite
<b>C<sub>3</sub>S</b>	Silicates tricalciques (Alite)
<b>βC<sub>2</sub>S</b>	Silicates bi calciques (Bélite)
<b>C<sub>3</sub>A</b>	Aluminates tricalciques
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	Alumino-ferrites tétracalciques

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## Problématique

Avec une consommation mondiale annuelle de l'ordre de 7,5 milliards de mètres cube, le béton est de loin le matériau de construction le plus utilisé sur la planète pour offrir à ses habitants les infrastructures nécessaires à un cadre de vie décent. Cette position est le résultat de nombreux facteurs dont les principaux sont la disponibilité mondiale des matières premières, la simplicité du mode constructif à base de béton (conception, versatilité et réalisation), la maîtrise des coûts et de l'impact environnemental (faible énergie grise et recyclabilité).

Le développement durable du béton permet, entre autre, 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.

Ce succès est surtout le résultat d'un siècle de science qui a permis de maîtriser la formulation des bétons dont le cahier des charges présente toujours des contradictions nécessitant une démarche d'optimisation. Le béton est en effet un matériau d'une extrême complexité, devant satisfaire des attentes multiples, de celles du constructeur qui souhaite des bétons faciles à mettre en œuvre et performants au jeune âge, à celles du maître d'ouvrage qui pense plutôt à la durée de vie de l'ouvrage en passant par le bureau d'études qui se « concentre » sur les performances mécaniques lors de l'exécution et en service.

En effet, même si l'on arrive à produire en laboratoire un béton conforme aux exigences en matière de performances mécaniques, il se peut que ces objectifs ne soient pas atteints au niveau de la structure si la mise en place est imparfaite ; une présence de nids d'abeille et des signes de ségrégation après le décoffrage peuvent être constatés s'il y a une insuffisance ou un excès d'énergie de vibration durant la mise en place.

Ceci est le résultat d'une main-d'œuvre peu qualifiée, et un manque de surveillance et de coordination sur chantier entre l'ingénieur concepteur et l'ingénieur chargé de l'exécution des travaux.

Afin d'assurer des structures uniformes et éviter de telles erreurs de mise en place du béton, surtout dans le cas où le niveau de congestionnement est élevé, l'idée de produire des bétons fluides qui s'étalent dans les coffrages sans effort de vibration, est une solution intéressante. C'est ainsi que le concept du béton autoplaçant est né.

Les bétons autoplaçants (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. Ils sont très déformables et épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, grâce à leur bonne uniformité une fois mis en place, ils donnent des structures résistantes et durables.

Quelques fois, on parle de béton autonivelant (BAN) pour les dalles et toutes les parois horizontales et de BAP pour les murs et toutes les parois verticales.

Les principes de formulations des bétons autoplaçants se distinguent par le fait qu'ils présentent un volume de pâte (ciment + sables + eau + adjuvants + fines) plus élevé que les bétons ordinaires, ils se caractérisent aussi par une quantité de fines élevée (environ 700 kg/m<sup>3</sup> de diamètre inférieur à 80 µm) et l'emploi incontournable de superplastifiants. Le liant utilisé est fréquemment un mélange de deux ou trois constituants, afin d'éviter l'élévation de température du béton lors de la prise du ciment.

La pâte liante a pour rôle d'améliorer la fluidité et la déformabilité du béton par la diminution des frottements inter-granulaires qui freinent l'étalement du béton et sa capacité de remplissage.

Une nouvelle famille d'adjuvants, appelés rétenteurs d'eau ou agents viscosifiants, entre également parfois dans leur formulation. Ces derniers vont donner de la viscosité à la pâte, pour lui conférer certaines propriétés qui visent à limiter la ségrégation.

La dernière caractéristique des BAP c'est qu'ils contiennent une faible proportion de granulats de l'ordre de 20 mm. Pour ces bétons, on essaie le plus possible de travailler avec des granulats de 16 mm de taille maximale, voir dans la mesure du possible moins.

Ce sont ses propriétés à l'état frais qui distinguent essentiellement le béton autoplaçant du béton ordinaire, le BAP s'écoule sous son propre poids avec un débit suffisant sans qu'il soit nécessaire de faire appel à des moyens de vibration ou de serrage. Le BAP doit pouvoir ainsi s'écouler sans vibration dans des zones confinées ou très ferraiillées, tout en possédant une fluidité élevée, et une bonne résistance à la ségrégation.

Pour assurer un volume de pâte suffisant, deux possibilités sont offertes : la première consiste en l'augmentation du dosage en ciment, ce qui induit un surcoût sur le plan économique et des risques de fissuration par une exothermie importante, sur le plan technique, alors que la deuxième consiste en l'emploi de diverses additions minérales.

En effet, ces additions sont souvent des déchets industriels (laitier granulé de haut fourneau), ménagers (verre d'emballage coloré) ou de démolition en béton ou en maçonnerie, qui sont à faible impact économique et environnemental.

De nombreuses études ont montrés les effets favorables des additions minérales fines sur les propriétés des BAP à l'état frais et à l'état durci, notamment les fines pouzzolaniques [1]. Cependant, l'influence des additions minérales sur la fluidité des BAP dépend du dosage, du type, de la finesse et de la forme des particules.

Les fines siliceuses lorsqu'elles sont introduites dans le BAP conduisent à des propriétés semblables à celles obtenues pour les bétons à hautes performances à savoir une augmentation de la compacité et donc des résistances mécaniques plus élevées.

En général, le critère de fluidité - stabilité est assez difficile à garantir, mais, au moyen des adjuvants, des teneurs élevées en ajouts minéraux ou des teneurs appropriées en sable et en gros granulats, la stabilité et la déformabilité sont assurées. L'ajout d'une quantité de poudre à un béton, permet de diminuer le ressuage et la ségrégation dans ce béton.

Cependant, malgré les aspects intéressants qu'ils proposent, en particulier à l'état frais, et leur utilisation en constante augmentation, les BAP ne disposent pas encore du recul nécessaire et suffisant pour être acceptés par tous les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre ce qui limite encore leur diffusion.

De nos jours, l'utilisation des argiles traitées, notamment celles qui sont riches en  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , connaît un nouvel essor dans le domaine de la technologie du béton. De nombreux travaux réalisés ou en cours, sont relatifs à l'utilisation des minéraux argileux comme la kaolinite, et certains mélanges de minéraux argileux, ayant une activité pouzzolanique qui favorisent le développement durable des performances mécaniques des coulis, mortiers ou bétons à base de ciment.

L'utilisation des fines issues d'argile cuite dans les compositions des bétons autoplaçants (BAP) a pour objectif d'améliorer leur comportement rhéologique et mécanique et de favoriser une meilleure durabilité.

L'emploi de ces déchets dans les BAP pourrait constituer une alternative intéressante aussi bien sur le plan environnemental par l'économie de matières premières et la réduction d'émission de gaz carbonique, générée par la fabrication du ciment, que sur le plan technico-économique par l'amélioration des propriétés des BAP à l'état frais et à l'état durci que pourrait apporter la poudre de brique rouge.

Ce retour d'expérience, dont bénéficient les bétons ordinaires vibrés employés jusqu'ici, est essentiel pour le comportement mécanique des BAP. De plus, la nécessité actuelle de trouver de nouvelles solutions techniques respectant le développement durable amène à étudier aussi l'évolution des déformations différées libres (retraits) compte tenu du volume important de pâte présent dans ces bétons (lié aux quantités importantes de fines préconisées).

### **Objectifs de la recherche**

L'objectif de cette recherche consiste à analyser, grâce à des essais expérimentaux, l'influence de l'ajout des fines issues d'argile cuite (le cas de déchet de brique broyée) sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des BAP. Dans ce cadre, il est proposé d'identifier la nature et la physico-chimie de ces fines, de déterminer leurs activités pouzzolaniques par essais mécaniques, d'optimiser le squelette granulaire, la pâte liante et la teneur en ajout chimique d'un BAP.

### **Plan de travail**

Le mémoire de thèse sera composé de cinq chapitres présentés comme suit :

Les trois premiers chapitres feront l'objet d'une analyse bibliographique :

Afin d'initier le lecteur à mieux comprendre certains termes relatifs à la technologie des bétons, nous avons jugé nécessaire d'entamer notre travail par des généralités sur la pâte liante (ciment et additions minérales). De ce fait, le premier chapitre présente le processus de fabrication des ciments, leurs compositions chimiques et minéralogiques ainsi que leur processus d'hydratation. Il présente également les additions minérales les plus utilisées dans le domaine de la nouvelle technologie des bétons.

Le second chapitre présente des notions fondamentales relatives aux caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants et les résultats donnés dans la littérature, qui sont relatifs aux diverses expériences de laboratoire sur l'optimisation des teneurs en gros granulats, sable, liant, ajouts chimiques et minéraux et la caractérisation mécanique des bétons autoplaçants.

Des généralités sur l'utilisation de l'argile cuite dans la fabrication des bétons sont données dans le troisième chapitre.

Les deux derniers chapitres seront consacrés à l'étude expérimentale :

Nous présentons au quatrième chapitre l'ensemble des techniques et essais effectués au laboratoire, en donnant à chaque fois le principe de base de l'essai et en décrivant le mode opératoire, et les résultats des essais d'identification et d'analyse des différents matériaux utilisés dans le programme expérimental.

Dans le dernier chapitre, nous exposons les principaux résultats liés à l'étude de l'influence de l'ajout des fines issues d'argile cuite (le cas de déchet de brique broyée) sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des BAP.

Finalement, une conclusion et des recommandations de ce travail sont présentées dans une conclusion générale.

# **CHAPITRE I**

## **Ciments et ajouts - Généralités**

## I.1. INTRODUCTION

Le ciment est un mélange de clinker et de gypse qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte faisant prise suite à un processus d'hydratation et conservant sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

Pour des raisons économiques, écologiques et de durabilité, certains ajouts cimentaires sont introduits au ciment Portland.

Les ajouts cimentaires sont généralement soit des sous-produits, soit des gisements naturels. Grâce à leur propriétés physico-chimiques et minéralogiques, leur introduction au ciment permet d'améliorer la compacité de la matrice cimentaire et par conséquent l'aboutissement à des bétons durables de bonnes performances physico-chimiques et mécaniques.

L'utilisation des sous-produits dans la production de ciment Portland permet, non seulement le recyclage des déchets, mais aussi la réduction implicite de l'énergie de fabrication du ciment et donc une diminution des gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>). Il est à noter que la fabrication d'une tonne de clinker libère au tant de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Selon leurs compositions chimiques, les ajouts cimentaires peuvent avoir un rôle physique de remplissage « filler » ou physico-chimique « filler et pouzzolanique ». Dans ce qui suit nous nous intéressons aux ajouts cimentaires pouzzolaniques et leur influence sur les propriétés des bétons.

## I.2. CIMENT PORTLAND

Pendant la préhistoire et au début de l'Antiquité, on utilisait l'argile comme liant pour l'assemblage des pierres. Lors de la construction des pyramides, les Égyptiens utilisèrent un plâtre obtenu par cuisson d'un gypse. Plus tard, les Grecs, puis les Romains, se servirent de la chaux produite par la cuisson du calcaire, dans leurs constructions.

À partir du 1<sup>er</sup> siècle av. J.-C, ils améliorèrent le liant en y ajoutant des pouzzolanes, particules très fines d'origine naturelle, comme les cendres volcaniques, ou artificielles, comme la poussière de briques. Ils obtinrent ainsi le ciment romain.

Ce liant fut utilisé sans grandes modifications jusqu'en 1756, date à laquelle l'Anglais Smeaton, lors de la construction du phare d'Eddy stone, mélangea des chaux

hydrauliques et des pouzzolanes. Il obtint ainsi le premier liant artificiel, avec lequel il prépara un mortier aussi dur que la pierre de Portland.

En 1817, l'ingénieur français Louis Vicat, suivi, au début des années 1820, par Treussart, ainsi que par Pavin de Lafarge, découvrit et définit les formules des ciments actuels, préparés alors dans des fours verticaux. Les fours rotatifs firent leur apparition vers 1880 et sont toujours utilisés. À l'heure actuelle, les cimenteries se sont équipées de matériels plus performants.

Le constituant principal des ciments est le clinker, qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respective moyenne de 80 % et 20 %.

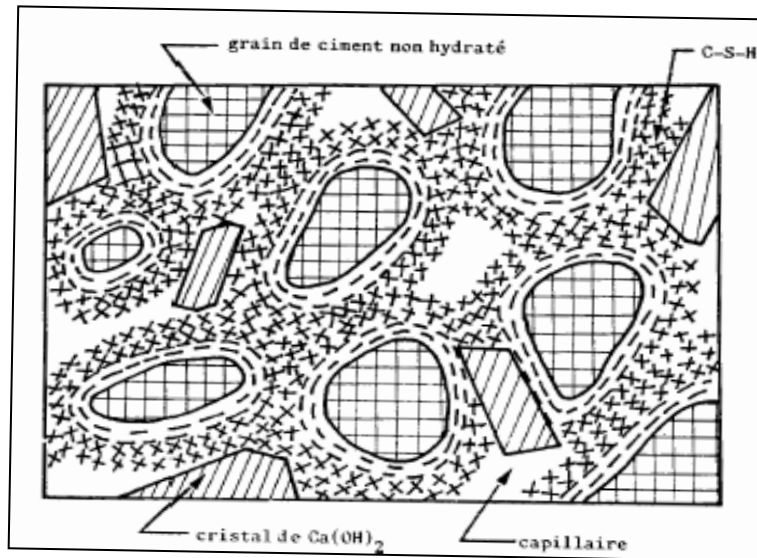
Celui-ci, finement broyé avec du gypse (moins de 5 %) pour régulariser la prise, donne le ciment Portland. Les autres types de ciment sont obtenus en ajoutant d'autres constituants tels que du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des schistes calcinés, du calcaire, des fumées de silice ou encore des fillers.

Le ciment Portland contient quatre constituants principaux : le silicate tricalcique  $3\text{CaOSiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ); le silicate bicalcique  $2\text{CaOSiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ) ; l'aluminate tricalcique  $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ ); l'alumino-ferrite-tétracalcique  $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_4\text{AF}$ ). Ces constituants anhydres donnent naissance, en présence d'eau, à des silicates et des aluminates de calcium hydratés C-S-H ainsi que de la chaux hydratée dite portlandite formant un gel microcristallin, à l'origine du phénomène dit de «prise». C'est le développement et la multiplication de ces microcristaux dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques. Le ciment durci est une véritable «roche artificielle» qui évolue dans le temps en fonction des conditions extérieures.

L'analyse micro-structurelle d'une matrice de ciment Portland durci, à peu près totalement hydraté, fait apparaître la composition typique suivante : 55% de silicates de calcium hydratés complexes (C-S-H), 20% d'hydroxyde de calcium (portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), 10% de trisulfoaluminates (ettringite  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), 7% d'eau et 8% de vides [2].

Les C-S-H formés jouent le rôle de colle qui solidarise les granulats entre eux pour former un matériau rigide. C'est surtout l'hydratation du  $\text{C}_3\text{S}$  et du  $\text{C}_2\text{S}$  qui participent le plus au développement de la résistance en produisant des C-S-H. La figure I.1 montre une représentation schématique d'une pâte de ciment partiellement hydraté, [3]. On y retrouve :

- des grains de ciment (10 à 80  $\mu\text{m}$  au départ) partiellement hydratés et recouverts d'une couche d'hydrates ;
- des capillaires remplis ou partiellement remplis d'eau ;
- des hydrates, surtout des C-S-H et de la chaux qui remplissent graduellement les espaces entre les grains de ciment ;
- des pores de gel non représentés (trop petits) et les bulles d'air trop grandes pour apparaître sur cette figure.



**Figure I.1 - Présentation schématique de la pâte de ciment hydraté [3]**

La plupart des propriétés du béton, et plusieurs aspects de durabilité, sont directement liés aux caractéristiques de la pâte de ciment durci. Il est donc important de comprendre la structure de base de la pâte de ciment hydraté. Pour fabriquer un béton à hautes performances, De Larrard recommande les ciments Portland artificiels de classe 52.5 (CPA-CEM I 52.5) ou les ciments à hautes performances (CPA HP) à faible teneur en  $\text{C}_3\text{A}$ , ou les HTS (Haute Teneur en Silice). Ces types de ciments conduisent à de meilleures maniabilités, avec un rapport E/C faible et assurent une bonne résistance mécanique en donnant à la pâte liante une bonne compacité [4].

### I.3. FABRICATION DU CIMENT

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux ( $\text{CaO}$ ) avec la silice ( $\text{SiO}_2$ ), l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires alors que l'alumine, la silice et l'oxyde de fer sont issus des argiles.

Calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450°C) dans un four rotatif qui tourne à la vitesse de 1 à 2 tours/min, le produit obtenu après refroidissement rapide est le clinker.

Le clinker, auquel on ajoute quelques pourcentages de gypse entre 3 à 5% est ensuite finement broyé de manière à obtenir une poudre dont la masse volumique absolue varie de 3 à 3.2 g/cm<sup>3</sup>.

L'ajout de plusieurs constituants secondaires (pouzzolane, cendres volantes, laitier..) modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. Ces ajouts ont donné naissance à plusieurs variétés de ciment à base clinker que sont les ciments composés de type CEM II, CEM III, CEM IV et CEM V.

Ces ajouts ont généralement la propriété de fixer la chaux Ca(OH)<sub>2</sub>, formée lors de l'hydratation du ciment pour donner des composés hydratés plus stables.

- Les pouzzolanes naturelles sont des roches volcaniques riches en silice ;
- Les cendres volantes sont récupérées dans les centrales thermiques à charbon ;
- Les laitiers sont des sous-produits de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques et s'obtiennent par refroidissement de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans les hauts fourneaux.

#### I.4. COMPOSITION DU CIMENT

Les ciments sont issus du broyage des granules de clinker et de gypse, et éventuellement un ou deux constituants secondaires. Les composés minéralogiques principaux du ciment sont donc ceux du clinker à partir duquel il a été fabriqué.

##### I.4.1. Clinker

Le ciment résulte du broyage d'un certain nombre de constituants. Le plus important étant le clinker formé de silicates et d'aluminates de calcium. Dans la zone de clinkérisation du four, les oxydes simples (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se combinent pour donner les minéraux suivants (figure I.2)

- Silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S) : 3CaOSiO<sub>2</sub> (Alite)
- Silicate bicalcique (C<sub>2</sub>S) : 2CaOSiO<sub>2</sub> (Bélite)
- Aluminate tricalcique (C<sub>3</sub>A) : 3CaOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Célite)
- Ferro-aluminate-tétracalcique (C<sub>4</sub>AF): 4CaOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Célite)

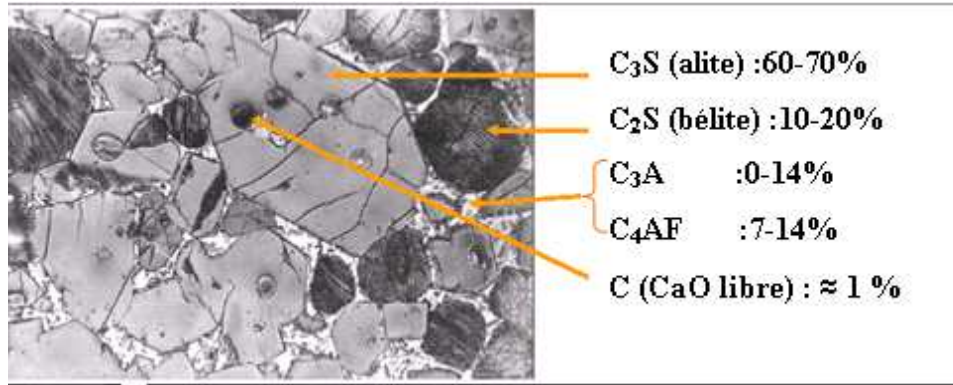


Figure I.2 - Vue au microscope optique des minéraux du clinker

### 1) Silicate tricalcique ( $C_3S$ )

C'est le minéral le plus important du clinker et le plus actif. Il est défini comme une solution solide de silicates tricalciques ( $3CaOSiO_2$ ) renfermant de nombreux éléments étrangers comme : Al, Mg, Fe.....

Il se présente sous l'aspect de cristaux polygonaux de forme hexagonale dont la taille moyenne est égale à 50  $\mu m$ .

Il est responsable de la plus grande partie des propriétés du ciment durci (après hydratation).

### 2) Silicate bicalcique ( $C_2S$ )

Il est défini comme solution solide du silicate bicalcique ( $2CaOSiO_2$ ). C'est le minéral qui contribue à augmenter les résistances à long terme. Il présente différentes variétés polymorphiques stables dans des intervalles de températures bien définis. La vitesse d'hydratation de  $C_3S$  est plus grande que celle de  $\beta C_2S$ .

### 3) Aluminate tricalcique ( $C_3A$ )

L'aluminate tricalcique ne possède aucune transformation polymorphique, il se cristallise sous forme de lames hexagonales

La Célite désigne la solution solide de différents éléments dans le  $C_3A$ . Il peut y avoir jusqu'à 2,5 % de MgO, 3% de  $Cr_2O_3$ , 1% de  $MnO_2$ , 9% de  $Na_2O$  et 0,4 % de  $K_2O$ .

Elle est caractérisée par une:

- ✓ Grande vitesse d'hydratation;
- ✓ Prise rapide;
- ✓ Chaleur d'hydratation élevée.

#### 4) Alumino-ferrite-tétracalcique ( $C_4AF$ )

Le  $C_4AF$  représente entre 5 et 10% de la composition du ciment Portland. Les formes  $C_6A_2F$  et  $C_4AF$  sont les plus couramment rencontrées dans le ciment. La réactivité de l'alumino-ferrite-tétracalcique dans l'eau est modérée et elle augmente avec la teneur en alumine. Les phases  $C_3A$  et  $C_4AF$  sont liquides à la température de formation du clinker, et elles constituent au cours du refroidissement, une phase interstitielle qui se cristallise entre les cristaux de  $C_3S$  et  $\beta C_2S$ .

#### 5) Les composés mineurs

Comme il a été mentionné précédemment, aucune des phases principales du clinker ne se trouve à l'état pur. La présence d'impuretés dans le clinker ( $MgO$ , sulfates alcalins,  $CO_2$ ) joue un rôle important sur les propriétés hydrauliques du ciment. Ces composés mineurs proviennent généralement des matières premières, du combustible et parfois des réfractaires ou des équipements.

#### I.4.2. Gypse ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )

Le clinker « pur » très fin est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable. Ce fait est surtout dû à la célite ( $C_3A$ ) qui s'hydrate rapidement tandis que ses hydrates deviennent rapidement compacts et se cristallisent.

Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydroaluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydroaluminate tricalcique et produit un gel insoluble l'hydrosulfoaluminate de calcium ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ ). La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en  $C_3A$  dans le liant et lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydroaluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial.

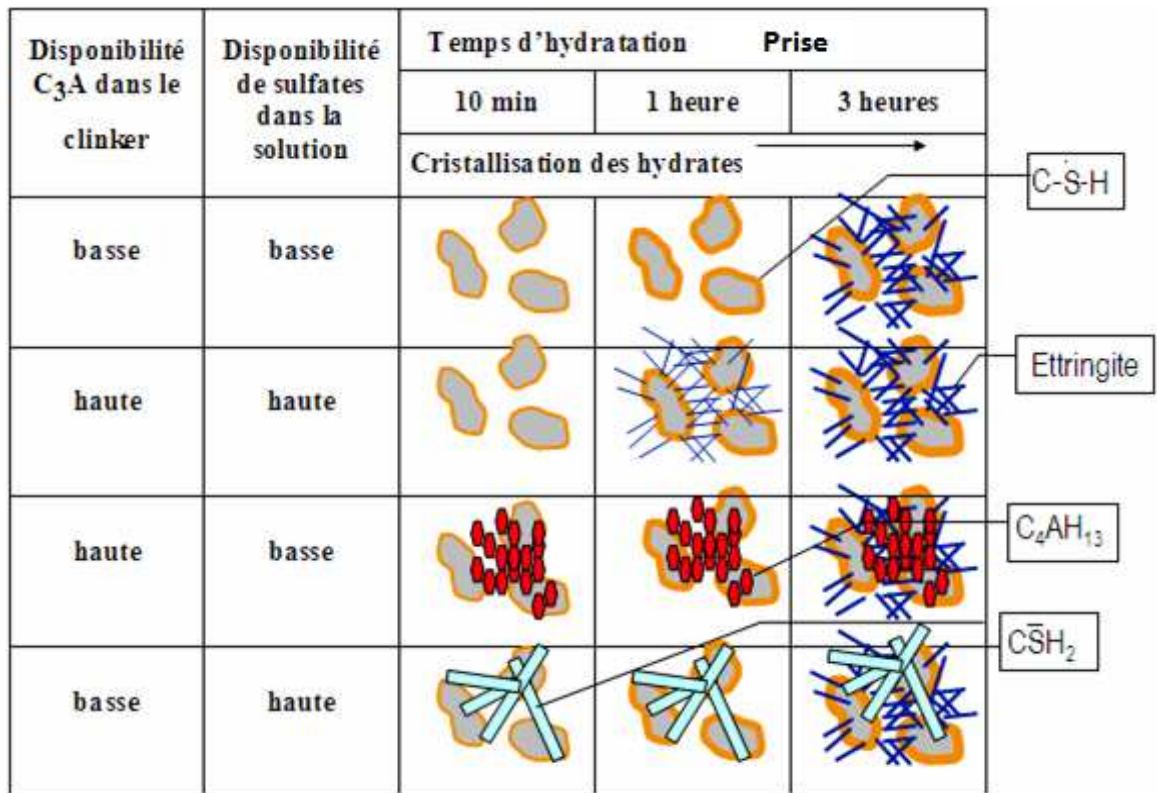


Figure I.3 - Influence du rapport aluminat/sulfate sur la prise

### I.5. HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND

En chimie des ciments, l'hydratation désigne l'ensemble des actions de l'eau intervenant dans la prise et le durcissement du ciment, à savoir, la dissolution, l'ionisation, l'hydrolyse, la solvatation, l'adsorption, et enfin l'hydratation (fixation de l'eau sur un corps) qui définit l'action globale de l'eau sur le ciment.

Elle commence dès la mise en contact de l'eau avec le ciment, les réactions chimiques d'hydratation des différents constituants conduisent à l'obtention d'une pâte fluide, qui se transforme assez rapidement en une masse durcie.

#### I.5.1. Mécanisme d'hydratation du ciment

Il faut admettre, que les détails du processus chimique, qui transforme la pâte de ciment en une masse solide, ne sont pas encore totalement compris. Les réactions chimiques qui se produisent sont tellement complexes, que l'on a pu dire que le béton est le fruit d'une technologie très simple, mais en même temps, d'une science très complexe. Cependant, des progrès ont été réalisés dans ce domaine, de telle sorte que les principales étapes de la réaction d'hydratation soient mieux connues.

La réaction d'hydratation du ciment portland avec l'eau produit un dégagement de chaleur qui peut être mesurée par calorimétrie. Le dégagement de chaleur et l'évolution de l'hydratation peuvent être ainsi suivis dans le temps.

La courbe caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment figure I.4 peut être décomposée en cinq périodes distinctes, ces périodes peuvent être décrites de la manière suivante :

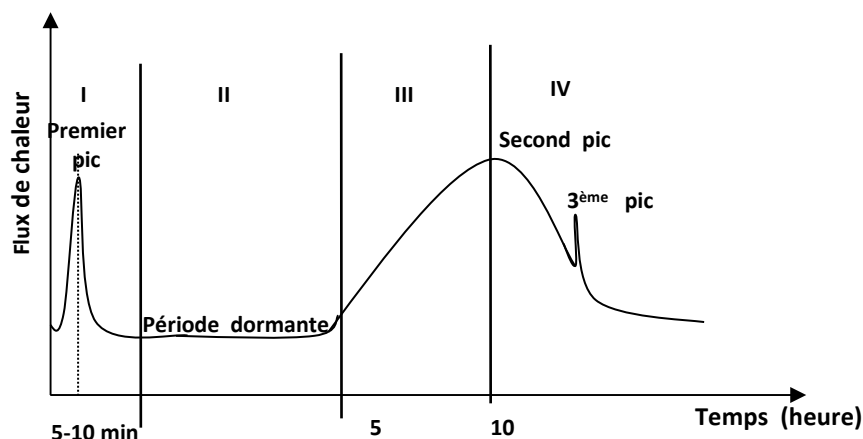
**Phase I - Période de pré-induction** (de gâchage) : caractérisée par une forte activité chimique et un fort dégagement de chaleur. Les ions  $\text{Ca}^{+2}$  sont lessivés de la surface pour former la Portlandite en solution CH et simultanément les molécules d'eau sont fixées sur la surface et des C-S-H et de l'Ettringite se forment.

**Phase II - Période d'induction** (dormante) : caractérisée par une faible activité chimique et une inertie thermique. Au cours de cette période, qui dure quelques heures, la phase liquide est sursaturée vis à vis de CH, aucun ion de  $\text{Ca}^{+2}$  ne trouve place. La formation des C-S-H et de l'Ettringite se poursuit lentement.

**Phase III - Période d'accélération** (de prise) : l'activité chimique s'intensifie et le flux thermique augmente. La croissance des C-S-H établit des liaisons mécaniques assez fortes pour se séparer des cœurs anhydres entre les grains. Un squelette global et un réseau de capillaires se forment.

**Phase IV - Période de croissance:** l'Ettringite devient une source de sulfates vu l'épuisement du gypse. Le monosulfo-aluminates de calcium hydraté se forme alors qui se traduit par un pic exothermique très marqué pour les ciments riches en  $\text{C}_3\text{A}$ . Cette chaleur dégagée accélère l'hydratation des silicates.

La fin de cette période est caractérisée par un ralentissement. La pellicule des hydrates couvrant les grains de ciment est plus épaisse et moins perméable. Ce qui ralentit la diffusion de l'eau. Les réactions chimiques se poursuivent tant que l'état hydrique du matériau le permet.



**Figure I.4 - Représentation schématique d'une courbe calorimétrique lors de l'hydratation d'une pâte de ciment**

- ✦ **Le 1<sup>er</sup> Pic:** Correspond au mouillage et à la dissolution; son apparition est très rapide (quelques minutes).
- ✦ **Le 2<sup>ème</sup> Pic:** Correspond à la formation continue d'Ettringite et à un dégagement de chaleur plus important causé par l'hydratation du  $C_3S$ .
- ✦ **Le 3<sup>ème</sup> Pic :** Correspond à la conversion de l'Ettringite en monosulfate ainsi qu'à la reprise d'hydratation du  $C_3A$  (dont l'intensité et la rapidité d'apparition sont fonctions des teneurs en aluminates, sulfates et alcalins). En général ce 3<sup>ème</sup> Pic apparaît sous forme d'une bosse.

La mesure de la chaleur d'hydratation peut être réalisée à l'aide du :

- Calorimètre Dewar
- Calorimètre à conduction
- Calorimètre adiabatique

La quantité de chaleur dégagée par un ciment est fonction :

- Du rapport E/C
- De la composition du clinker
- De la finesse du ciment
- Du type d'ajouts cimentaires

### I.5.2. Chaleur d'hydratation

L'hydratation d'un ciment portland peut se décrire comme la résultante de l'hydratation des silicates, qui ne met en jeu que  $C_3S$ ,  $\beta C_2S$  et l'eau (H) et l'hydratation des aluminates, qui met en jeu  $C_3A$ ,  $C_4AF$ , l'eau (H) et le gypse ( $C\hat{S}H_2$ ) ces deux hydratations se déroulent simultanément.

La chaleur d'hydratation est l'une des caractéristiques les plus recherchées pour s'assurer des structures durables. Il est souvent recommandé l'utilisation des ciments à dégagement de chaleur inférieur à 270 J/g après 41 heures, particulièrement dans le cas du béton de masse et un bétonnage par temps chaud.

Les constituants du ciment présentent des vitesses d'hydratation (V) différentes, on trouve que  $V(C_3A) > V(C_4AF) > V(C_3S) > V(\beta C_2S)$ . Ces vitesses peuvent être influencées par le rapport E/C du béton, et par la nature et les proportions des ajouts cimentaires. La présence d'adjuvants, peut affecter la prise et le durcissement de la pâte liante.

Cependant, on est souvent conduit, pour des raisons de compatibilité avec les adjuvants, à choisir des ciments à faible teneur en aluminates (généralement peu exothermiques).

En effet, les BHP sans fumée de silice se placeraient, sous l'aspect thermique, en fourchette haute des bétons d'ouvrage d'art.

Les fumées de silice ont un rôle accélérateur sur l'hydratation du ciment. Par contre, leur combinaison avec la chaux du ciment (réaction pouzzolanique) ne s'accompagne que de faible dégagement de chaleur, comme pour les cendres volantes.

L'ajout du laitier du haut fourneau favorise une réduction notable du dégagement de chaleur d'hydratation.

Les résultats obtenus par A. Abib [5], sur l'évolution de la chaleur d'hydratation en fonction de la variation de la teneur en laitier, montrent que le dégagement de chaleur d'hydratation diminue avec l'augmentation de la teneur en ajout et que la présence de laitier contribue à la diminution de la quantité de chaleur ainsi que sa vitesse de dégagement.

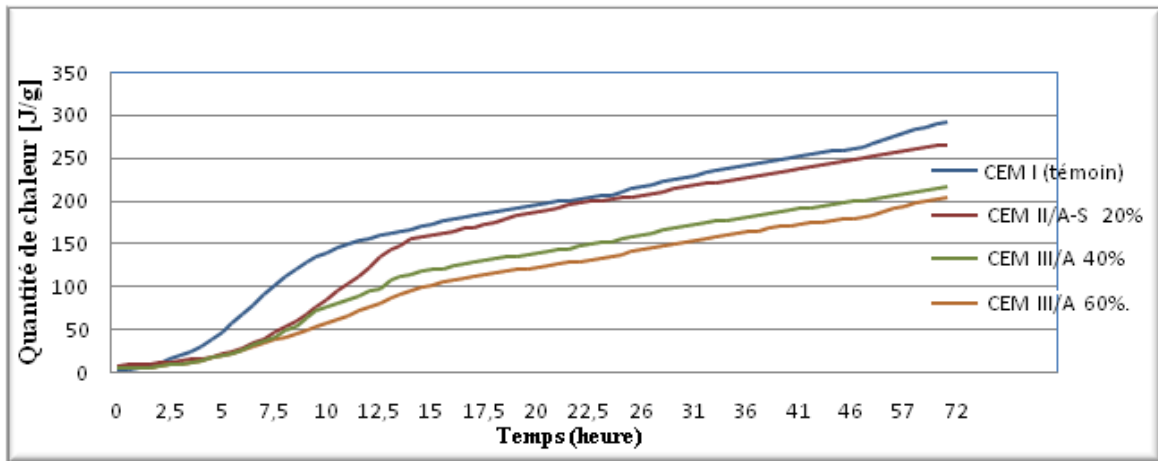


Figure I.5 - Evolution de la quantité de chaleur dégagée durant les 3 premiers jours d'hydratation [5]

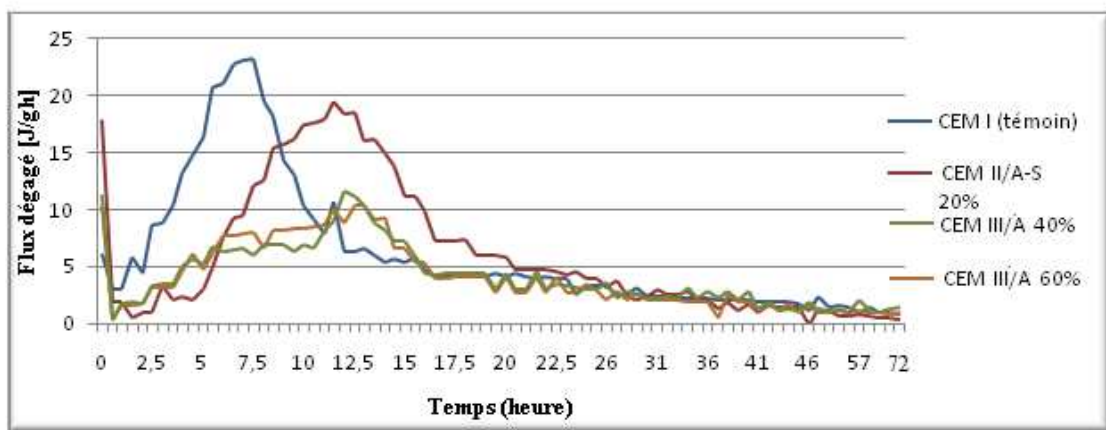


Figure I.6 - Evolution du flux de chaleur dégagée durant les trois premiers jours d'hydratation [5]

Des gradients élevés de température, dus à la chaleur d'hydratation, sont susceptibles d'engendrer de la fissuration pouvant apparaître dans des éléments en béton. On préfère donc des formulations à faible chaleur d'hydratation dans le cas des structures massives et étanches.

## I.6. CARACTERISTIQUES DU CIMENT PORTLAND

### I.6.1. Temps de prise

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié aux nombreux paramètres :

- ✓ Le type du ciment ;
- ✓ La finesse de mouture, le début de prise étant d'autant plus rapide que la finesse de mouture est grande ;
- ✓ La température ambiante, la prise étant stoppée à 0°C, alors qu'elle est très accélérée lorsque la température dépasse 30°C ;
- ✓ La présence de matière organique dans l'eau ;
- ✓ L'excès d'eau de gâchage, qui agit comme retardateur.

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ( $d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment.

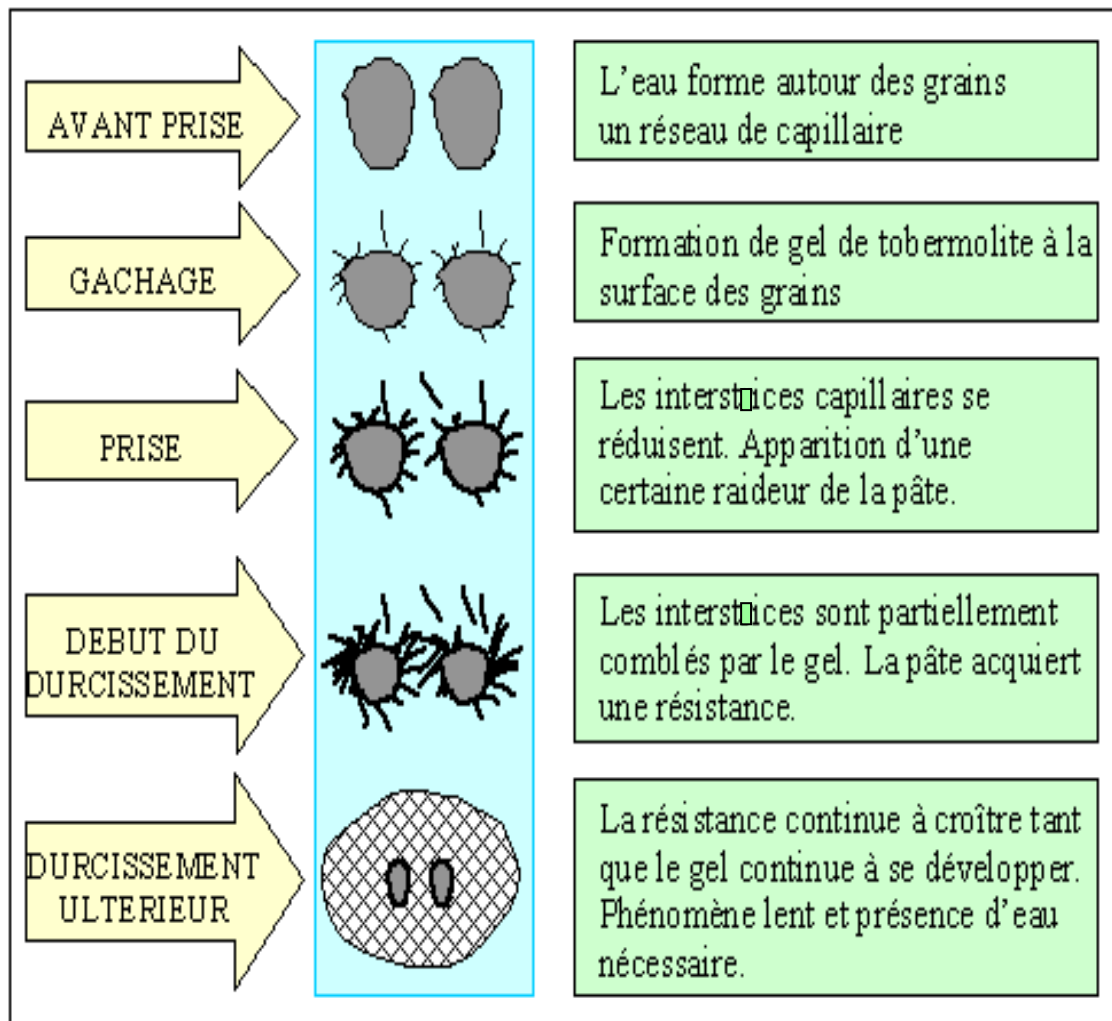
De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.

### 1.6.2. Le durcissement

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. Sa durée se prolonge pendant des années au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température, ce qui conduit notamment en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au bout de quelques heures.

Pour mieux comprendre les propriétés des ciments portland, il est intéressant d'étudier comment réagit en présence d'eau chacun des constituants anhydres du ciment pris isolément.



**Figure I.7 - Evolution physico-chimique de la pâte de ciment**

Dans une poudre de ciment portland en contact avec l'eau, l'aluminate tricalcique ( $C_3A$ ) réagit en premier, se dissout et se recristallise. Vient ensuite la réaction d'hydrolyse, de l'alite-Silicate tricalcique ( $C_3S$ ) forme autour des grains une pellicule de gel et met en même temps des ions  $Ca^{+2}$  en solution.

L'hydrolyse et la recristallisation de ( $C_3A$ ) sont rapides. Cette activité est si grande qu'il faut la retarder car elle conduirait à des prises rapides et rendrait le liant inutilisable sur chantier.

En gâchant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire. Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau pour produire des composés hydratés. Dans le cas des silicates de calcium  $C_3S$  et  $C_2S$ , la chaux hydratée se dissout et il se dépose des cristaux de  $Ca(OH)_2$  en plaquettes hexagones alors que

les silicates de calcium hydratés forment un gel composé de fines aiguilles à la surface du ciment.

Ces aiguilles se développent en dimension et en nombre tout en réduisant les interstices capillaires entre les grains. Quand les aiguilles entre les grains de ciment se rapprochent, la pâte devient plus raide. Cette rigidité est au début faible et peut encore être facilement détruite mécaniquement. C'est le début de la prise.

Après quelques heures, les interstices capillaires sont partiellement comblés par le gel. La pâte de ciment acquiert une certaine résistance. C'est le durcissement qui commence. La résistance continue à croître à mesure que le gel devient plus compact, d'une part, parce qu'il y a un accroissement de la cohésion entre les aiguilles et accroissement du feutrage des aiguilles, d'autre part, parce qu'il se formerait des joints de soudure entre les aiguilles de tobermolite des divers grains de ciment.

Dans les pâtes de ciment durcies, il reste de ce fait toujours des grains de ciment non hydratés.

L'hydratation des grains de ciment continue non seulement des mois, mais des années durant, pour autant que le gel soit entouré d'eau, car le gel de tobermolite ne peut se former qu'en présence d'eau.

### **I.6.3. Finesse de mouture d'un ciment**

La surface spécifique des ciments produits en usine est mesurée à l'aide de la méthode Blaine, elle varie entre 2500 et 3600 cm<sup>2</sup>/g.

Pour des poudres dont la surface spécifique dépasse 10000 cm<sup>2</sup>/g, on utilise généralement la méthode B.E.T, car la méthode Blaine n'est plus valable. Les dimensions moyennes des grains d'un ciment influent largement sur le degré d'hydratation, on estime que l'augmentation de la surface spécifique d'un ciment permet d'augmenter ses résistances mécaniques, les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, les risques de retrait et par conséquent de fissuration sont plus accrus. La finesse de mouture a également une action exothermique sur les réactions d'hydratation.

Dans les bétons à faible rapport E/C, cette augmentation de finesse conduit à l'augmentation de la compacité de la pâte. Par ailleurs, si la proportion de grains de ciment ultrafins devient importante, la prise risque d'être instantanée dès le gâchage,

on est donc conduit à limiter la finesse du broyage même dans le cas des BHP ou des BTHP, car la granulométrie est complétée par l'incorporation des ajouts minéraux très fins (fumée de silice). La surface spécifique Blaine doit être de l'ordre de 3500 à 4000 cm<sup>2</sup>/g.

La finesse de broyage évolue linéairement avec le temps jusqu'à une certaine limite, au-delà de laquelle celle-ci diminue, c'est dû au phénomène d'agglomération des fines, sa manifestation correspond à une phase non productive du broyage d'où une perte inutile d'énergie.

#### I.6.4. Retrait

La pâte de ciment se rétracte dans l'air sec (alors qu'au contraire elle gonfle dans l'eau), ce phénomène se poursuivant dans le temps et ceci pendant des durées d'autant plus longues que les pièces sont massives. C'est le retrait qui cause des fissures que l'on observe dans des pièces en béton.

En fait il existe plusieurs types de retrait:

- Le retrait avant prise dû essentiellement à la perte prématurée d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation et dont l'amplitude est dix fois celle du retrait hydraulique classique.
- Ce retrait qui provoque des contraintes de traction supérieures à la résistance du béton à la traction, qui est alors pratiquement nulle, se traduit par l'apparition, à la surface du béton encore plastique, de grosses crevasses peu profondes, pouvant être refermées par talochage,
- Le retrait hydraulique, qui découle d'une part de la contraction Le Chatelier (le volume des hydrates est inférieur au volume des constituants de départ) et d'autre part du retrait de dessiccation (contraction au séchage), est de l'ordre de 0,2 à 0,4 mm/m pour les bétons.

Dans le cas de béton à faible rapport E/C, la dessiccation d'origine "endogène" (consommation de l'eau de gâchage pour hydratation) peut être prépondérante sur la dessiccation par échange avec le milieu externe,

- Le retrait thermique, qui est dû à la contraction du béton lors de son refroidissement.

L'importance du retrait hydraulique, en dehors du facteur de temps, est fonction de nombreux paramètres parmi lesquels:

- ✓ la nature du ciment
- ✓ le dosage en eau
- ✓ la propreté des sables
- ✓ la forme et la dimension des granulats

#### **I.6.5. Caractéristiques mécaniques**

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par des essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression sur des éprouvettes (4 x 4 x 16) cm<sup>3</sup>. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment, et est exprimée en MPa.

### **I.7. LES PRINCIPALES CATEGORIES DU CIMENT**

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

#### **I.7.1. Classification des ciments en fonction de leur composition**

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition en cinq types principaux par la norme EN 197-1 (NA 442). Ils sont notés CEM suivi d'une numérotation de I à V (en chiffres romains) [6].

Tableau I.1 : Désignation des ciments selon la norme NF EN 197-1 - NA 442 [6]

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)	Composition (pourcentage en masse) <sup>a)</sup>											Constituants secondaires				
		Constituants principaux															
		Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire							
K	S	D <sup>b)</sup>	Naturelle P	Naturelle calcinée Q	Siliceuse V	Calcaire W	T	L	LL								
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5		
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—
	CEM II/B-V		65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	CEM II/A-W		80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
	CEM II/B-W		65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
	Ciment Portland composé <sup>c)</sup>	CEM II/A-M	80-94	← 6-20 →								—	—	—	—	—	0-5
CEM II/B-M		65-79	← 21-35 →								—	—	—	—	—	—	0-5
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique <sup>c)</sup>	CEM IV/A	65-89	—	← 11-35 →				—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	← 36-55 →				—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM V	Ciment composé <sup>c)</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	—	← 18-30 →		—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	—	← 31-50 →		—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5

a) Les valeurs indiquées se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.  
b) La proportion de fumées de silice est limitée à 10 %.  
c) Dans le cas des ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux, autres que le clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment (voir un exemple à l'article 6).

I.7.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance

Trois classes sont définies en fonction de la résistance nominale à 28 jours; des sous classes "R" sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32.5, classe 42.5, classe 52.5 (Tableau I.2).

Tableau I.2 : Classes de résistance des ciments selon NA 442 [6]

	32.5 N	32.5 R	42.5 N	42.5 R	52.5 N	52.5 R
<b>2 j</b>	-	8.0	8.0	18.0	18.0	28.0
<b>7 j</b>	14.0	-	-	-	-	-
<b>28 j</b>	30.0	30.0	40.0	40.0	50.0	50.0

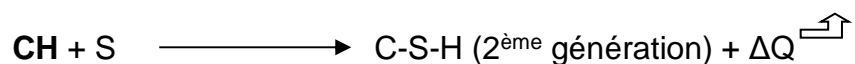
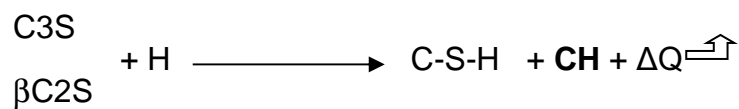
## I.8. AJOUTS CIMENTAIRES

Ce sont des particules de très faibles dimensions qui sont incorporées dans le béton pour améliorer ses caractéristiques physico-chimiques. Exemple : Fumée de silice, Cendres volantes, Laitiers de haut fourneau, Pouzzolanes, Metakaolin et Fillers calcaires.

### I.8.1. Réactivité des ajouts pouzzolaniques

Un ajout pouzzolanique est tout matériau siliceux ou silico-alumineux, qui en présence d'eau, réagit avec l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$  pour former des gels à propriétés liantes.

La chaux (portlandite) dégagée par le clinker, lors de l'hydratation de ciment, est soluble dans l'eau ; elle affecte considérablement la durabilité du béton. De ce fait il est plus bénéfique de la fixer par introduction des éléments siliceux, pour former des C-S-H de la 2<sup>ème</sup> génération, suivant la réaction ci-dessous :



Cette réaction permet d'améliorer d'avantage les performances des bétons.

Les ions hydroxyles activent la dissolution des ions  $\text{SiO}_4$  par rupture des liaisons Si-O et Al-O à la surface des particules de pouzzolanes.

Ces derniers réagissent immédiatement avec des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  présents dans la solution interstitielle pour former un composé amorphe intermédiaire. Celui-ci se dissocie par la suite pour permettre la formation de C-S-H par combinaison avec la portlandite.

### I.8.2. Fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium (Si) et du ferrosilicium (SiFe). Du point de vue chimique la fumée de silice est composée essentiellement de silice ( $\text{SiO}_2$ ), [7]. Elle se présente sous formes de sphère ayant un diamètre variant entre 0,1 et 2  $\mu\text{m}$ . Ce qui veut dire 100 fois plus petite qu'une

particule de ciment. Vu sa finesse, elle vient dans le béton densifier la matrice cimentaire, ce qui donne un béton plus compact avec une meilleure adhérence pâte-granulats [8].

En présence d'un superplastifiant, l'addition de la fumée de silice réduit considérablement le ressuage. Elle est utilisée dans la confection des BHP, et pour les bétons coulés sous l'eau. Son dosage dans le béton à hautes performances peut atteindre jusqu'à 10% du poids du ciment. [8]

Afin de limiter les déchets polluants de l'industrie du silicium et de ses alliages, les pays scandinaves ont utilisé les fumées de silice comme un ajout dans le béton. Cependant, le développement de la technologie des adjuvants et surtout les superplastifiants hauts réducteurs d'eau a facilité l'incorporation des fumées de silice, et a contribué dans l'amélioration des caractéristiques du béton que ce soit à l'état frais ou à l'état durci [9].

### **I.8.3. Laitier vitrifié de haut fourneau**

Le laitier de haut fourneau ou le laitier broyé est un sous produit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Il possède des propriétés hydrauliques proches de celles du clinker s'il est refroidi brutalement, s'hydrate moins vite mais présentent une meilleure stabilité vis-à-vis des milieux agressifs.

Le laitier a été jusqu'à présent utilisé à des dosages variant entre 15 et 30 % du poids du ciment. Sa finesse Blaine est généralement comprise entre 4500 et 6000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . L'utilisation d'un laitier est souvent invoquée pour diminuer la température maximale d'un BHP qui sera utilisé pour couler des éléments massifs.

Le laitier granulé est disponible en Algérie au complexe de sidérurgie d'El-Hadjar à Annaba. Il se présente sous la forme d'un sable de granulométrie 0/3 mm, de couleur claire, de masse volumique apparente  $1\text{g}/\text{cm}^3$  et de masse volumique absolue  $2.9\text{g}/\text{cm}^3$ . Lafarge Algérie utilise environ 150 KT du laitier El Hadjar par an pour fabriquer un ciment résistant au sulfates de type CEM III/A 42,5N - ES.

#### I.8.4. Cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par le système de dépoussiérage des centrales thermiques fonctionnant au charbon ou à la houille. Les particules de cendre volante peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland [2]. Les diamètres de ces sphères varient de 0,5 à 200  $\mu\text{m}$ . C'est une addition de type II [10].

Les cendres volantes peuvent être ajoutées dans le béton à raison de 40 à 100 kg par  $\text{m}^3$ , elles permettent [11] :

- une amélioration de l'ouvrabilité ;
- une réduction de la teneur en eau ;
- une diminution du ressuage et de l'imperméabilité ;
- une meilleure durabilité ;
- au-delà de 15 jours une augmentation appréciable des résistances mécaniques.

L'amélioration est d'autant plus marquée que les cendres sont plus fines.

#### I.8.5. Fines calcaires

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, provenant de gisements de roches calcaires ou dolomitiques, massives ou meubles. Deux de ces caractéristiques sont particulièrement significatives pour compléter cette définition :

- une teneur minimale en carbonates totale (calcaires + dolomie), ainsi qu'une teneur minimale en carbonate de calcium ;
- une valeur minimale de l'indice d'activité.

Les additions calcaires ne sont ni de type II (étant non pouzzolanique), ni du type I (ayant un indice d'activité). Les effets des additions sur les propriétés du béton durci peuvent avoir une origine physique ou une origine chimique. Les fines calcaires tendent à accélérer l'hydratation du ciment. Au cours de ces réactions d'hydratation, elles créent une meilleure répartition des hydrates, en particulier la portlandite. Leur présence accélérerait l'hydratation du ciment dès les premiers instants et ce d'autant mieux que les particules sont fines et la quantité de  $\text{CaCO}_3$  grande. Elles participent ainsi aux réactions d'hydratation du ciment, en particulier, les  $\text{CaCO}_3$  et les

aluminates réagiraient chimiquement en présence d'eau pour former un mono-carboaluminate de calcium hydraté. Par ailleurs, par leurs effets fillers, les fines calcaires constituent un complément de la granularité, augmentant ainsi la maniabilité, la compacité ainsi que la réduction du ressuage.

Les résultats obtenus par A. El Hilali [12] montrent que l'ajout des fillers ayant une grande surface de Blaine améliore la fluidité du BAP particulièrement en milieu confiné, sa résistance à la ségrégation et la robustesse de sa formulation. De même, il apparaît que la finesse des fillers influe sur la demande en superplastifiant de façon significative.

### **I.8.6. Sable de dune broyé**

La valorisation du sable de dune dans l'industrie cimentaire en Algérie est l'une des dernières recommandations des travaux de recherche sur la pouzzolanité des additions minérales en Algérie.

L'activité pouzzolanique des ajouts a été toujours associée à la présence d'une phase amorphe produite lors du broyage. Cependant, plusieurs recherches actuelles ont montré que le quartz broyé présente une activité pouzzolanique dite « *partielle* ». Cette réactivité est principalement liée à la présence des fines particules amorphes adsorbées sur les particules cristallines. [13]

L'analyse minéralogique par DRX du sable de dune (Algérien) broyé présentée dans la figure I.8, montre que ce sable présente une structure cristallisée du type *Low-Quartz*. Les grains du sable se présentent sous formes de deux populations dont la première renferme les fines particules amorphes adsorbées sur de grosses particules cristallisées (2<sup>ème</sup> population), comme illustré dans la figure I.9. [13]

Selon K. Arroudj [13], la présence de fines particules amorphes du quartz, rend le sable de dune réactif. Ce qui est traduit par une amélioration de la résistance mécanique du mortier (de l'ordre de 66 MPa en présence de 25% de Sable de dune).

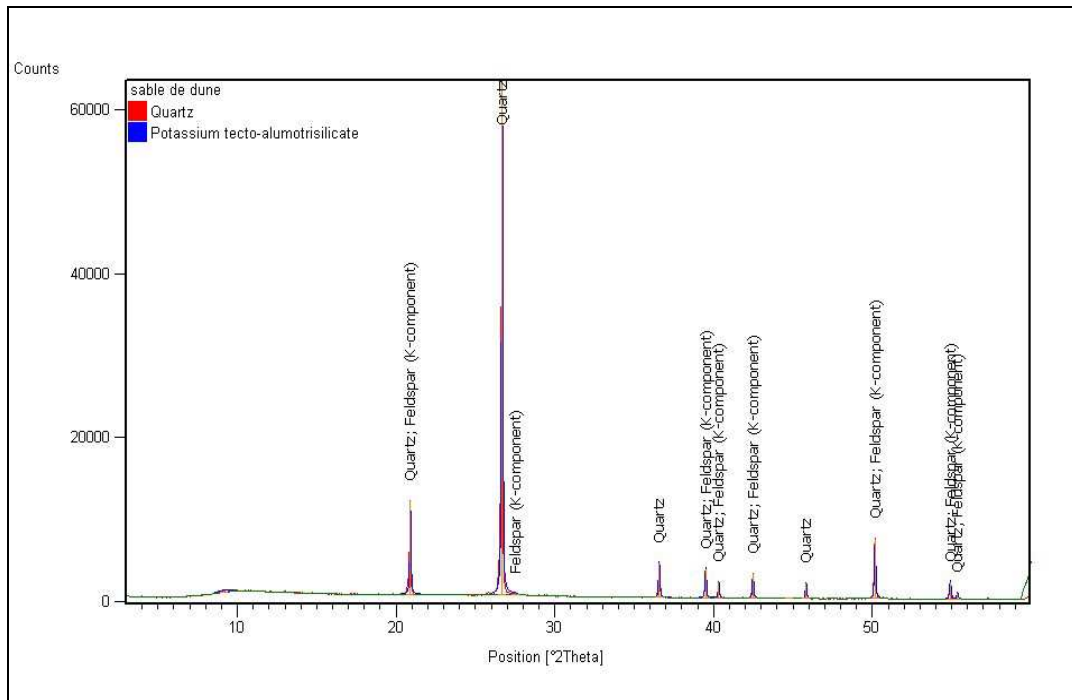


Figure I.8 - Diffractogramme X du sable de dune broyé [13]

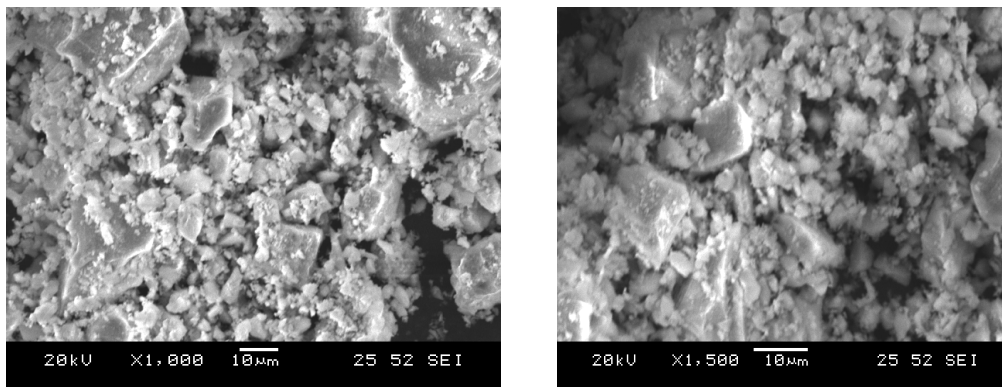


Figure I.9 - Vue par MEB des particules du sable de dune broyé [13]

# **CHAPITRE II**

## **Béton autoplaçant - Etat de connaissances**

## II.1. INTRODUCTION

La science de la formulation des bétons modernes trouve son origine au début du vingtième siècle avec l'apparition des moyens technologiques de malaxage (bétonnières et autres malaxeurs). A l'origine, le béton était un matériau plutôt de consistance terre humide, damé à refus dans les coffrages. L'apparition des moyens de malaxage a permis de réduire les temps de construction de même que la pénibilité du travail tout en améliorant la qualité des constructions mais en contrepartie, a complexifié l'acte de formuler.

Le levier de formulation immédiat pour passer d'une consistance humide à ouvrable est évidemment l'eau. L'esprit est de créer, par malaxage, un état de suspension homogène des particules solides que sont le ciment, le sable et les gravillons afin de leur donner une certaine mobilité que l'on nomme sous le terme générique d'ouvrabilité. Ce faisant, le matériau va être cisailé lors de son transport et de sa mise en œuvre, et il faut alors s'assurer qu'il garde son homogénéité, gage de ses performances ultérieures.

Cependant, les structures actuelles se caractérisent par la complexité de leurs modèles telles que les formes variables et les courbures multiples, ainsi que par leur forte concentration en armatures, ce qui rend l'application des bétons ordinaires à ces types d'ouvrages très difficile avec des défaillances structurales très probables. Toutefois, pour construire des structures durables et fiables il est nécessaire non seulement, de développer un béton de qualité, mais aussi d'assurer une mise en place correcte afin de répondre aux exigences demandées pour la mise en service de la structure.

## II.2 DEFINITION DU BETON AUTOPLACANT

De nombreux termes définissent ce béton : béton autonivelant, béton autocompactant (SCC en anglais), ou béton hyperfluide. Cependant, l'appellation la plus utilisée aujourd'hui dans le domaine de construction est béton autoplaçant, terme utilisé dans cette thèse.

Les bétons autoplaçants (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. Ils sont très déformables et épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, grâce à leur bonne uniformité une fois mis en place, ils donnent des structures résistantes et durables.

### II.3. HISTORIQUE DES BETONS AUTOPLACANTS

L'idée de produire des bétons autoplaçants est apparue pour la première fois au Japon en 1986. Le Japon fut donc le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique.

Ces bétons très fluides étaient en même temps stables et présentaient une bonne résistance à la ségrégation et au ressuage.

Afin de satisfaire les conditions habituellement contradictoires (déformabilité et résistance à la ségrégation), on a fait appel à la technique des bétons coulés sous l'eau ; en effet, la première génération des bétons autoplaçants est formulée de la même manière que les bétons destinés aux structures submergées, mais avec une viscosité plus faible et donc une maniabilité plus élevée. Ces bétons contiennent souvent des agents de viscosité ou agents colloïdaux afin de résister à la ségrégation des gros granulats et au phénomène de ressuage.

L'utilisation de cette nouvelle gamme de béton est en train de devenir de plus en plus répandue partout dans le monde. 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.

Les bétons autoplaçants offrent un grand nombre de possibilités très intéressantes dans de nombreux domaines : constructions, renforcement et réparation d'ouvrage d'art (application de couches minces dans des endroits difficiles d'accès), construction d'éléments préfabriqués à haute résistance, moulage et mise au point de béton pour toute utilisation (bétons coulés sous l'eau pour des réparations, bétons confines, pieux,.....etc.).

À titre d'exemple nous citerons quelques réalisations Japonaises :

- Le pont Kiba park. où 650 m<sup>3</sup> de bétons autoplaçants ont été utilisés avec une résistance à la compression à 28 jours de 60 MPa ; **[1]**
- Le pont Akashi Kaikyo, le plus long pont suspendu au monde (3910 m) où 390 000 m<sup>3</sup> de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration ; **[14]**
- Le bâtiment Landmark Tower où un béton autoplaçant d'excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune ; **[15]**

- Le stade de Fukuoka où 10 000 m<sup>3</sup> de béton autoplaçant ont été utilisés pour des sections très ferrillées et de formes compliquées [16].

D'autre part, plusieurs autres structures (réservoirs, murs de soutènement, poteaux, etc.) ont été construites totalement ou partiellement avec des bétons autoplaçants.

#### II.4. SPECIFICITES DE LA COMPOSITION DES BAP

Les approches de composition des BAP, sont basées sur les critères suivants :

**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 limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Le liant utilisé est fréquemment un mélange de deux ou trois constituants, afin éviter l'élévation de température du béton lors de la prise du ciment.

**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 des superplastifiants :**

La maniabilité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Cet ajout ne doit pas être très élevé (proche du dosage de saturation) 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.

**d) Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (agent de viscosité):**

Ce sont généralement des dérivés celluloses, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, qui augmentent la viscosité de l'eau. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse.

Ces adjuvants semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant élevés, mais leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faible.

Les agents de viscosité ont la réputation de rendre les bétons autoplaçants moins sensible à des variations de la teneur en eau, ils peuvent en parallèle conduire à des entraînement d'air excessifs et à une diminution de la maniabilité.

**e) Un faible volume de gravillon :**

Les risques de blocage 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 [1].

**II.5. MATIERES PREMIERES UTILISEES DANS LES BAP****II.5.1. Liants et granulats**

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 souvent du ciment CPA-CEM I 52,5 ou 42,5.

Le liant est constitué de ciment au quel on ajoute des particules fines minérales qui correspondent à des additions normalisées ou non; ce sont principalement :

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

Le développement durable du béton permet entre autre 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.

Le remplacement d'une fraction de ciment par des cendres volantes ou de laitier permet d'obtenir un maintien d'ouvrabilité plus long. Les fillers calcaires ont un effet inverse, ils constituent des sites de nucléation pour la formulation des hydrates et favorisent ainsi la prise du matériau.

La fumée de silice, lorsqu'elle est introduite dans le BAP [9], conduit à des propriétés semblables à celles obtenues pour les bétons à hautes performances à savoir une augmentation de la compacité et donc des résistances mécaniques plus élevées.

Dans les BAP, la proportion des gravillons par rapport au sable est plus faible qu'avec un béton ordinaire afin de permettre l'écoulement du matériau dans les zones confinées. Le rapport massique G/S est de 1 [17]. Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés et concassés. Néanmoins, comme dans le cas des bétons traditionnels, la forme des granulats a une influence sur la rhéologie des BAP. Les

coefficients de frottements sont plus faibles entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés.

### II.5.2. Adjuvants des bétons

Comme toutes les poudres mélangées dans un liquide, les grains de ciment ont tendance à s'agglomérer entre eux du fait de la polarité de ce liquide. Les grains de ciment ont un diamètre moyen de 10 à 50 microns.

Dans la pratique, quand ils sont mis en œuvre dans le béton, ils ne restent pas à l'état de grains isolés et se regroupent pour constituer des agglomérats (des floccs) bien plus gros ayant une dimension de 500 à 800 microns. Ces floccs piègent de l'eau qui, ainsi, n'apporte pas l'ouvrabilité que l'on serait en droit d'attendre.

Pour résoudre cela, il existe des adjuvants chimiques ou *produits défloculants* qui permettent d'obtenir une meilleure répartition des grains de ciment. Grâce à ces produits, les bétons présentent une meilleure rhéologie, les grains étant mieux répartis, la résistance est plus homogène et améliorée figure II.1.

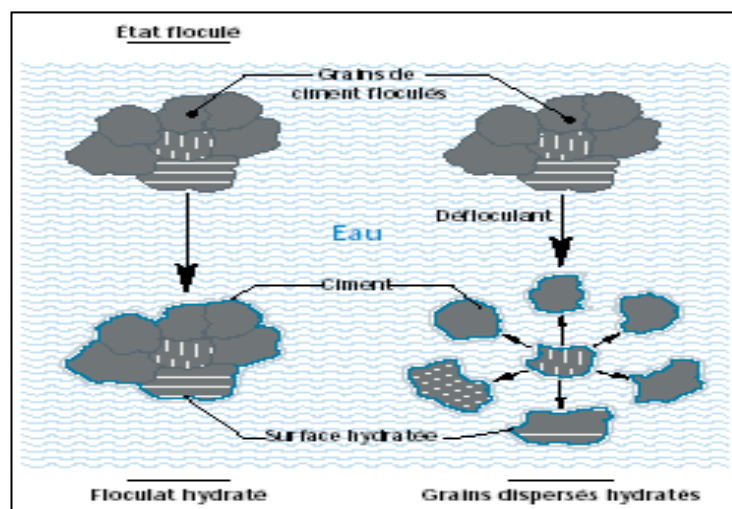


Figure II.1 - Défloculation des grains de ciment en présence d'un superplastifiant

L'usage des adjuvants a besoin d'être bien contrôlé, parce que toutes les combinaisons ne sont pas toujours compatibles et bénéfiques pour les propriétés du béton.

Quelques-uns de ces produits réagissent les uns avec les autres, avec des phases du ciment ou les produits d'hydratation.

Parmi les adjuvants chimiques les plus utilisés, les superplastifiants, sont les plus efficaces, car ils améliorent l'ouvrabilité sans augmenter la quantité d'eau de

gâchage. Leur découverte, vers la fin des années soixante-dix avec leurs propriétés dispersantes exceptionnelles, a permis à la technologie du béton de faire un pas de géant, il est devenu possible de fabriquer des bétons fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons de très faible rapport E/C faciles à mettre en œuvre.

Grâce aux superplastifiants, d'une part l'eau n'est plus le seul ingrédient du béton permettant de contrôler sa rhéologie, et d'autre part, il devient possible de rapprocher considérablement les grains de ciment lors du malaxage.

En rapprochant les grains de ciment, on peut fabriquer des bétons à matrice cimentaire très dense et très imperméable qui présente une résistance à la pénétration des agents agressifs sans commune mesure avec celle du béton ordinaire. Les dosages habituels utilisés varient de 0,5 à 2 % du poids du ciment.

D'autres adjuvants chimiques tels que les agents colloïdaux (ou modificateur de la viscosité) permettent la production de béton autoplaçant. Les bétons autoplaçants nécessitent un usage simultané de superplastifiant et d'agent colloïdal. Quelques-uns de ces produits sont à base de gomme de polysaccharide et d'autres à base d'hydroxyde propyle méthyle cellulose. Ces produits augmentent la viscosité et la stabilité des bétons autoplaçants qui ont besoin d'un dosage élevé en superplastifiants pour obtenir une bonne fluidité.

Les agents de viscosité diminuent la ségrégation et le ressuage du béton dû à un haut dosage en superplastifiant. La sélection et le dosage de ces deux adjuvants devraient être bien contrôlés et leur compatibilité bien étudiée avant d'utiliser leur effet synergique pour optimiser les propriétés du béton autoplaçant [18].

### **II.5.2.1. Superplastifiant**

L'utilisation des superplastifiants en combinaison avec les ajouts cimentaires ont ouvert plusieurs voies technologiques intéressantes tels que : les bétons à hautes performances, les bétons autoplaçants et les bétons à poudres réactives.

Les agents réducteurs d'eau ordinaires tel que les lignosulfonates sont utilisés dans des bétons ayant un rapport eau/ciment de 0,40 ou plus. Quand une réduction d'eau plus élevée est exigée, l'usage de superplastifiants est recommandé.

Les polymères synthétiques sont les plus efficaces pour ce but. Les produits à base de poly-naphtalène sulfonate et de poly-mélatamine sulfonate sont les plus utilisés depuis plusieurs années. Ils peuvent accomplir jusqu'à 30% de réduction d'eau [18].

Une nouvelle génération de superplastifiants à base de polyacrylates a été développée récemment et peut accomplir la même réduction de l'eau que les superplastifiants antérieurs pour un dosage qui est beaucoup plus inférieure. Quelques ajustements sont faits pour diminuer les effets secondaires de ces produits; tel que l'entraînement excessif d'air ou un retard excessif de la prise du ciment.

Pour ajuster la fluidité d'un BAP en fonction des contraintes de mise en place et des résistances mécaniques désirées, il est nécessaire d'utiliser un superplastifiant.

Les superplastifiants utilisés pour les BAP sont les mêmes que ceux employés pour les autres types de bétons.

Les principaux superplastifiants sont à base de :

- Copolymère formaldéhyde Naphtalène Sulfonate (PNS),
- Copolymère formaldéhyde Mélatamine Sulfonate (PMS).
- Polymère avec fonction Acrylate (PA).
- Polymère avec des fonctions Carboxylate (PC).
- Monomère avec les fonctions Phosphonate et/ou Carboxylate (MPC).

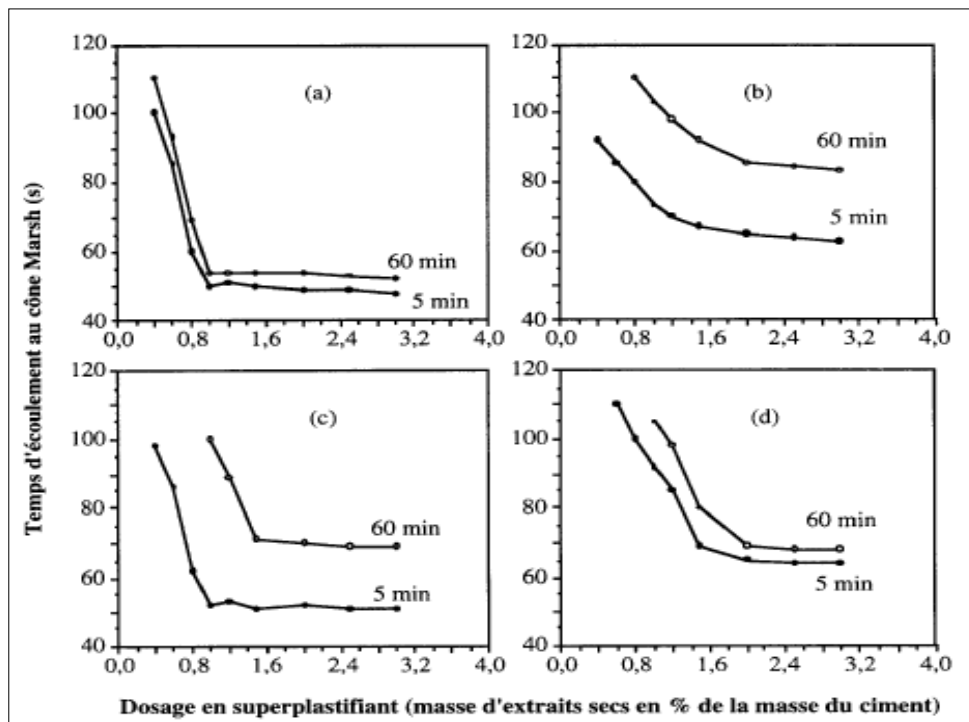
Les superplastifiants interagissent avec les particules de ciment et éventuellement avec les additions en s'adsorbant à leur surface ce qui permet d'éviter le phénomène de floculation au contact de l'eau. Les particules sont ainsi dispersées par combinaison d'effet électrostatique et stérique et la proportion d'eau libre est plus importante.

Pour une composition granulaire donnée, la capacité de remplissage d'un BAP dépend fortement du dosage en superplastifiant. Elle croit avec le dosage en superplastifiant jusqu'à un maximum au delà duquel apparaissent les phénomènes de ségrégation des constituants.

Par ailleurs, des phénomènes d'incompatibilité ciment - superplastifiant sont devenus de plus en plus fréquent avec le développement de la technologie des BHP et BAP. Ces phénomènes sont liés à une interaction entre le superplastifiant et le sulfate de calcium présent dans le ciment.

En plus de leur action dispersante, les superplastifiants peuvent réagir avec le  $C_3A$  (Aluminates tricalcique), bloquer la formation d'ettringite et même retarder ou bloquer plus ou moins la mise en solution de la plupart des différentes formes de sulfate de calcium que l'on retrouve dans le ciment.

On peut facilement illustrer de tels comportements en étudiant le comportement de coulis fabriqués à partir de certains ciments. Lorsqu'on étudie le comportement rhéologique des coulis ayant un faible rapport E/C ou E/L en mesurant le temps d'écoulement au cône Marsh, on peut se retrouver d'une façon systématique, face à quatre situations. Lessard, Gendreau, Baalbaki et Pigeon ont illustré ces situations lorsqu'on fait varier le dosage en superplastifiant : Figures : **II.2 (a), (b), (c) et (d)** établies.



**Figure II.2 - Comportement rhéologique de coulis à faibles rapports E/C en présence d'un superplastifiant [18]**

Les figures **II.2 (c)** et **(d)** représentent des situations intermédiaires. À la figure **(c)**, la courbe à 5 minutes ressemble à celle de la figure **(a)** tandis que la courbe à 60 minutes ressemble à celle de la figure **(b)**. Dans le cas de la figure **(d)** c'est le contraire qui se produit ; la courbe d'écoulement à 5 minutes ressemble à celle de la figure **(b)**, tandis que la courbe d'écoulement à 60 minutes ressemble à celle de la figure **(a)**. Même s'il n'a pas une bonne fluidité initiale, le coulis de la figure **(d)** ne voit pas sa rhéologie se détériorer dans le temps.

On peut améliorer le comportement rhéologique de coulis correspondant au cas des figures (b), (c) et (d) en ajoutant une quantité appropriée de retardateur de prise de façon à se retrouver avec des coulis dont le comportement est similaire à celui représenté à la figure (a).

Malheureusement, ce n'est pas toujours aussi facile à faire qu'à dire et il n'est pas toujours possible d'en arriver à une solution aussi simple d'où il vaut mieux alors changer de ciment.

#### **II.5.2.2. Agent de viscosité**

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

Pour minimiser cet effet, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'avoir une plus grande quantité de liant pour assurer un écoulement sans ségrégation. Les agents de viscosité peuvent être de différentes natures:

- Polysaccharide obtenu par fermentation microbiologique du type gomme welan ou gomme de xanthane ;
- Dérivés cellulosiques à base de méthyle cellulose, d'hydroxy-éthyl cellulose ;
- Colloïde naturel ;
- Suspension des particules siliceuses.

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.

Il permet de conserver une répartition homogène des différents constituants, l'action de l'agent de viscosité étant d'une certaine façon opposée à celle du superplastifiant, l'optimisation de la fluidité et de la résistance à la ségrégation d'un BAP requiert la sélection d'un couple compatible de superplastifiant et d'agent de viscosité et l'ajustement de leur dosage.

En général, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de superplastifiant croît avec celle de l'agent de viscosité. Un dosage en agent de viscosité trop important empêche la pâte de se déformer et entraîne une perte de fluidité.

Notons également qu'une très forte quantité d'agent de viscosité peut conduire à un entraînement d'air excessif.

Les agents de viscosité permettent un maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps, sur une durée de l'ordre d'une heure.

Parmi les différents types d'agent de viscosité, ceux à base de polysaccharide et plus particulièrement la gomme welan semblent se différencier par la variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse. Une solution de gomme welan présente un seuil de cisaillement élevé et une faible viscosité pour des contraintes de cisaillement élevées.

De ce fait, un béton contenant de la gomme welan possède une forte déformabilité lorsqu'il s'écoule et celle-ci devient faible dès que le mouvement du matériau cesse.

Les BAP ont ainsi de meilleures résistances à la ségrégation dynamique et statique. Notons également les essais réalisés par Hayakawa et al. [15] qui ont utilisé comme agents de viscosité de l'amidon et une suspension de particules siliceuses. Les mesures effectuées sur bétons frais et sur béton durci montrent que la suspension de particules siliceuses, et dans une moindre mesure l'amidon peuvent se substituer à la gomme de welan.

Des recherches précédentes [19] ont montré que l'ajout de 0,05% d'un agent colloïdal de type polysaccharide diminue de 15% l'étalement d'un BAP, alors qu'il améliore considérablement sa stabilité (une diminution de 100% du taux ségrégation mesuré par l'essai de stabilité au tamis).

Concernant l'adsorption d'une partie des polymères à la surface des grains de ciment, celle-ci varie selon la nature des polymères et les caractéristiques du ciment. La quantité de polymère adsorbée est d'autant plus élevée que la finesse du ciment est grande. Cependant, deux ciments de finesse identique peuvent retenir des quantités de polymères différentes.

Les caractéristiques minéralogiques des grains de ciment sont autant de paramètres déterminants. La quantité de polymère adsorbée par un ciment donné dépend du caractère ionique plus ou moins prononcé de l'adjuvant et de son poids moléculaire.

Jusqu'à présent, il n'est pas encore possible de fabriquer des superplastifiants qui soient efficaces avec n'importe quel ciment, pour n'importe quel E/C, parce que la vitesse de dissolution des différentes formes de sulfates de calcium que l'on retrouve dans les ciments modernes varie beaucoup trop. Cependant, lorsqu'on fabrique un

ciment portland, si on prend en considération l'influence du sulfate de calcium sur la rhéologie des bétons à faible rapport E/L, il est possible d'ajuster la composition du ciment portland pour qu'il devient parfaitement compatible avec tout superplastifiants que l'on retrouve sur le marché.

Il faut reconnaître que les superplastifiants, quand ils sont bien utilisés, sont des constituants essentiels des bétons durables tout autant que le ciment. Grâce aux propriétés dispersantes très efficaces des superplastifiants, il est maintenant possible de fabriquer des bétons fluides à des rapports E/L très faibles de l'ordre de 0.32 ou même moins.

## **II.6. PROPRIETES RECHERCHEES DES BAP**

La rhéologie des bétons frais est autant reliée à la composition de la pâte de ciment qu'à celle du mélange de béton lui-même. Un des avantages des bétons autoplaçants est d'améliorer la déformabilité du mélange afin qu'ils puissent remplir facilement les coffrages sans utiliser un moyen de vibration (l'étalement du béton et sa mise en place se font seulement sous l'effet de la gravité).

En plus d'une ouvrabilité élevée on cherche aussi à améliorer la stabilité volumétrique des bétons autoplaçants.

La fluidité et la stabilité constituent les deux paramètres qui permettent de donner une appréciation sur les caractéristiques du béton à l'état frais. On entend par stabilité, la résistance à la ségrégation, à la sédimentation et au ressuage du béton.

### **II.6.1. Notion de déformabilité et de capacité de remplissage**

Le béton doit se déformer dans les coffrages pour contourner les obstacles qu'il peut rencontrer durant son écoulement. Cette déformation doit se faire sans qu'il y ait un risque de séparation de ses différents constituants.

La capacité de remplissage d'un béton est un indice d'ouvrabilité qui nous renseigne sur la déformabilité, la cohésion et la résistance à la ségrégation d'un béton pendant sa mise en place [20].

En plus de la qualité du béton (composition et teneur en liant, rapport E/L, teneur en ajout chimique,...etc.). La capacité de remplissage est affectée par la forme des coffrages, l'espacement des armatures et la méthode de mise en place du béton.

Une étude expérimentale a été réalisée par Ozawa et coll. [20] pour évaluer la capacité de remplissage d'un BAP sous des conditions sévères.

L'essai, comme le montre la figure II.3, consiste à déverser 30 litres de béton autoplaçant dans un contenant cubique dont le fond contient un grillage ayant un maillage de 50 mm. Le maillage est supposé simuler une zone fortement congestionnée d'un coffrage.

Une trappe empêche le béton de s'écouler avant le moment de l'essai, on applique une pression uniforme de  $0,1 \text{ kg/cm}^2$  sur toute la surface du béton et on ouvre la trappe. Lorsque l'écoulement cesse, on mesure la quantité du béton ayant traversée le grillage.

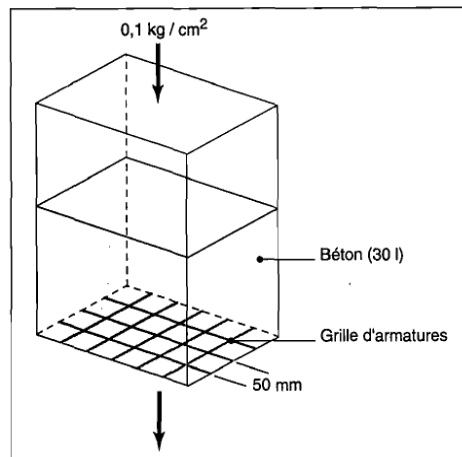


Figure II.3 - Essai de la boîte, capacité de remplissage [20]

La relation entre le volume du béton passant à travers le grillage et l'affaissement est présentée par le graphe de la figure II.4 :

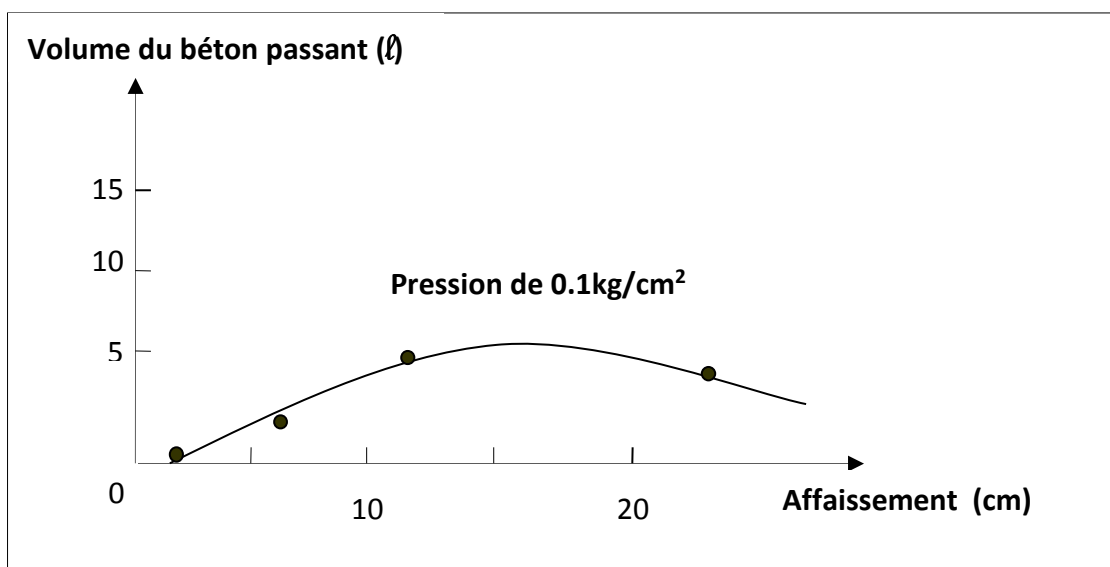


Figure II.4 - Variation du volume de béton passant en fonction de l'affaissement (Essai de la boîte) [20]

Cette relation n'est en fait pas linéaire, mais elle possède plutôt un optimum pour les bétons à faible affaissement, il y a une difficulté d'écoulement à cause d'un manque de déformabilité.

Par contre, dans le cas des affaissements élevés, on assiste à un phénomène de ségrégation. Le béton possède une très faible viscosité et les granulats se séparent du mortier pour former des arches et bloquent l'écoulement.

La capacité de remplissage maximale correspond à un affaissement où la courbe de la déformabilité et celle de la résistance à la ségrégation se coupent (figure II.5) :

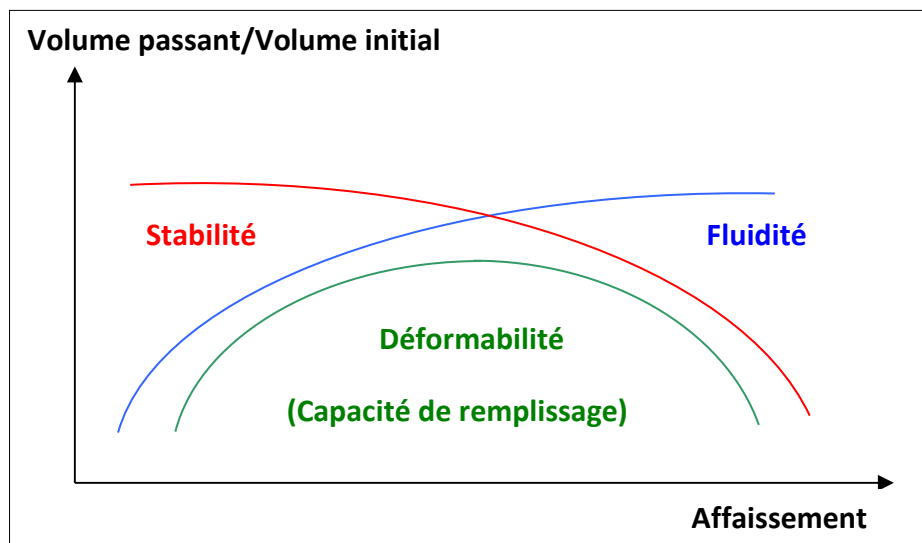


Figure II.5 - Capacité de remplissage ou déformabilité maximale [20]

La capacité de remplissage est contrôlée principalement par la déformabilité du béton à faible affaissement et par la résistance à la ségrégation à affaissement élevé. L'eau libre est l'un des facteurs qui définissent la déformabilité, la cohésion et la résistance à la ségrégation. Il s'agit de la fraction d'eau de malaxage qui n'est pas retenue, physiquement ou chimiquement, par les granulats et le liant. Cette eau est responsable de l'amélioration de l'ouvrabilité du béton, et elle est calculée de la manière suivante :

$$E_l = E - (E_g + E_p) \dots \dots \dots (II.1)$$

Avec :

- $E_l$  : Eau libre ;
- $E$  : Eau totale dans le mélange ;
- $E_g$  : Eau retenue par les granulats ;
- $E_p$  : Eau retenue par le liant.

Ozawa et coll. [20] ont montré que la déformabilité est uniquement fonction de l'eau libre. En effet, ils mesurent le volume de sable maximal que peut contenir un mortier de rapport E/L donné pour que toute la quantité de mortier passe à travers un cylindre percé de trous ayant un diamètre égal à l'espacement entre les gros granulats dans un béton.

On constate que, plus le rapport E/L augmente, plus on peut mettre du sable pour une quantité fixe de pâte (cf. figure II.6). Cependant cet essai montre la présence d'un rapport E/L optimal au-dessus duquel un excès de la quantité de sable ajoutée provoque un arrêt d'écoulement par blocage des grains de sable au droit des trous. C'est la ségrégation au niveau du mortier.

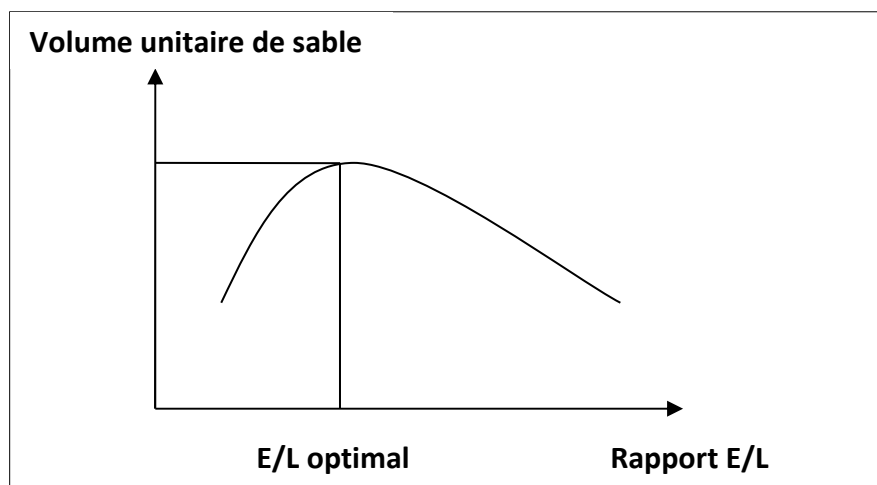


Figure II.6 - Variation de la demande en sable en fonction du rapport E/L [20]

## II.6.2. Fluidité

Les essais développés dans cette partie s'apparentent beaucoup plus à des essais technologiques qui dépendent certes des propriétés rhéologiques du béton mais ne permettent pas de déterminer un seuil de cisaillement ou une viscosité plastique, paramètres fondamentaux de la rhéologie des fluides d'une manière générale.

### II.6.2.1. Essai d'étalement

C'est l'essai le plus courant, il s'effectue sur une plaque métallique plane de plus de 90 cm de côté et à l'aide du cône d'Abrams ou du cône DIN de la table à choc.

À l'essai au cône d'Abrams, le BAP, du fait de sa fluidité s'étale et forme une galette dont on mesure le diamètre, qui dépasse souvent les 500 mm. La notion traditionnelle d'affaissement au cône d'Abrams n'a plus aucun sens avec ce genre de béton.

Dans le cas du cône d'Abrams l'étalement est noté slump flow et il est appelé flow table dans l'essai au cône DIN.

La valeur du slump flow d'un BAP est comprise entre 540 et 700 mm. Il existe une corrélation entre le slump flow et le flow Table.

À titre indicatif, quelques valeurs sont données dans le tableau II.1

**Tableau II.1 : Corrélation entre le Slump Flow et le Flow Table sans choc**

<b>Slump Flow (mm)</b>	540	600	700
<b>Flow Table (mm)</b>	430	500	680

### II.6.2.2. Viscosité plastique ( $\mu$ ) et temps d'étalement de 500 mm ( $T_{500}$ )

La mesure du temps d'écoulement d'un BAP ( $T_{500}$ ) a pour objectif d'évaluer la mobilité et la vitesse d'écoulement du béton autoplaçant en absence d'obstacles. La durée qui s'écoule entre le début du mouvement ascendant du cône et le moment où le béton atteint un diamètre de 500 mm est mesuré : c'est le  $T_{500}$ . Le plus grand diamètre d'étalement du béton et le diamètre perpendiculaire sont mesurés pour calculer le diamètre moyen. Les valeurs préconisées par les normes sont données au tableau II.2.

**Tableau II.2 - Valeurs préconisées par les normes [21]**

<b>Essais</b>	<b>Etalement (SF) mm</b>	<b><math>T_{500}</math> seconde</b>	<b>Stabilité au tamis SR %</b>	<b>Boite en L PL = <math>H_1 / H_2</math></b>
<b>Valeurs</b>	550 - 650	< 2	$\leq 20\%$	$\geq 0,8$ (deux barres)
	650 - 750	$\geq 2$	$\leq 15\%$	$\geq 0,8$ (trois barres)
	750 - 850	-	-	-

Les corrélations rhéologie - ouvrabilité les plus pertinentes sont celles reliant la viscosité plastique au  $T_{500}$ . En effet, Kurokawa et al. [22] ont mis en évidence une relation II.2 qui souligne la corrélation entre la viscosité et le temps d'étalement  $T_{500}$  confirmée par ailleurs par d'autres auteurs [23 - 24]

$$\mu = 10^{-3} \times \rho \times 0,0268 (\text{SF} - 2,39) T_{500} \quad (\text{II.2})$$

$\mu$  : Viscosité plastique du matériau en (Pa.S)

$\rho$  : Masse volumique du béton ( $\text{kg/m}^3$ )

**SF**: Etalement en (mm)

$T_{500}$  : Temps d'écoulement pour atteindre un diamètre de 500 mm.

### II.6.2.3. Essai de la table de fluidité

L'essai d'affaissement est exécuté sur un plateau circulaire de 670 mm de diamètre avec un bord élevé de 20 mm. Sur ce plateau, on impose des mouvements de montée et de descente de vitesse égale à 12,5 mm/s introduits par une manivelle.

Le nombre d'amplitudes qui correspondent à l'arrivée du béton au bord du plateau, au contact avec le demi périmètre et au contact total avec le plateau sont ainsi mesurés (Kasai et coll. 1991). Cet essai est aussi semblable à l'essai d'étalement « DIN1048 flow table » [1].

### II.6.2.4. Essai de la boîte en L

On remplit la partie verticale du L de béton (figure II.7), et on mesure la différence de la hauteur dans les parties verticales et horizontales. Pour un BAP, cette dernière doit être la plus faible possible.

Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrailés. Pour des applications moins ferrillées, il est possible d'alléger la grille de ferrailage en ne plaçant que deux barres avec un espace libre de 58 mm. En cas de blocage des gravillons, il convient de diminuer le volume de granulats et d'augmenter le volume de pâte en maintenant le rapport Eau/Liant constant.

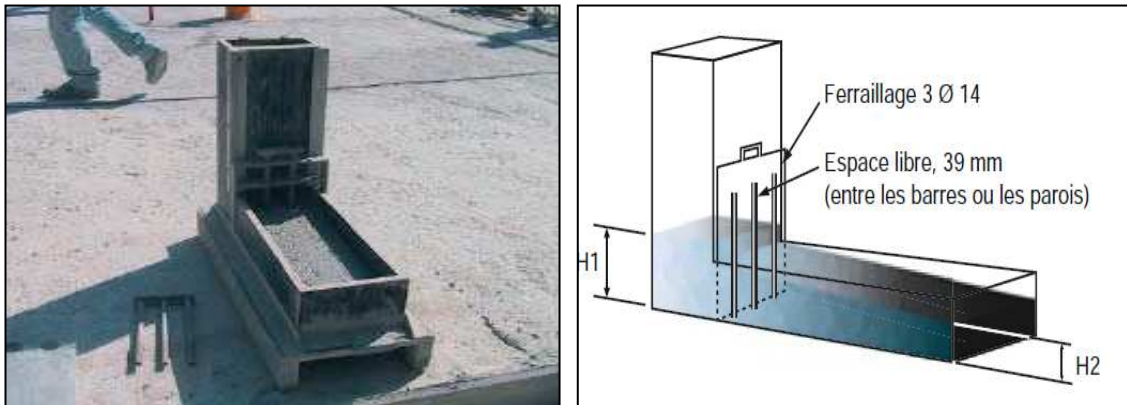


Figure II.7 - Essai de la boîte en L

### II.6.2.5. Essai du Box

L'échantillon de béton est mis dans un des deux compartiments d'une boîte en Plexiglas de (150 × 150 × 400) mm. Quand la porte de séparation des deux compartiments est levée, on mesure la dénivellation de hauteur du béton entre les deux compartiments. Cet essai permet d'évaluer la déformabilité du mélange qui sera excellente dans le cas où la dénivellation est négligeable.

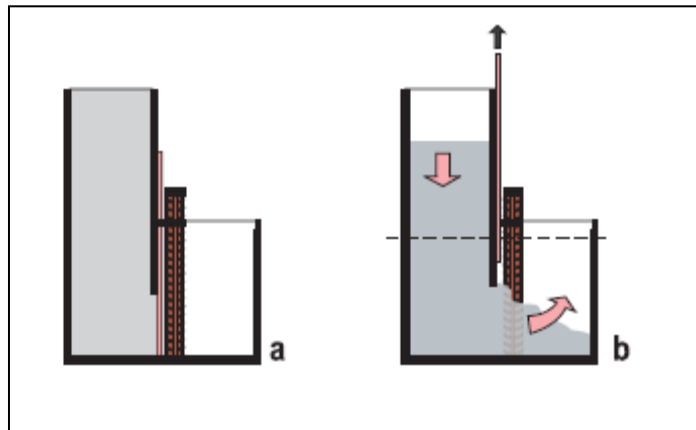


Figure II.8 - Essai de Box

### II.6.3. Stabilité

#### II.6.3.1. Essai de l'entonnoir en forme de V

L'essai consiste à mesurer le temps d'écoulement du béton dans un espace limité. Une section rectangulaire a été choisie pour imposer un écoulement du même type que celui qui est imposé entre deux armatures parallèles. Cet essai permet aussi d'évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement.

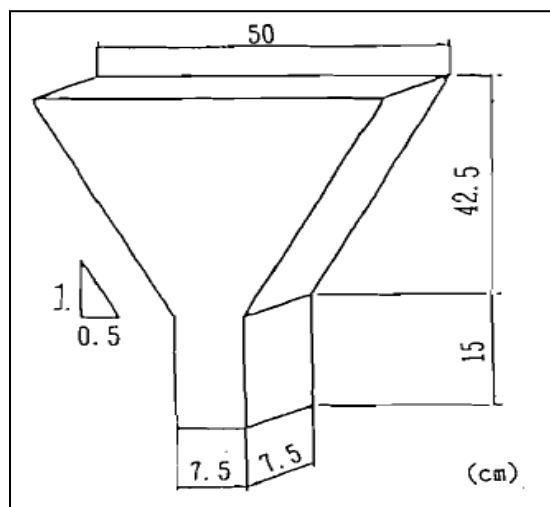


Figure II.9 - Essai de l'entonnoir en forme de V, d'après Sakata et al [25]

### II.6.3.2. Essai de tassement

Cet essai est réalisé sur des colonnes de béton de 70 cm ou de 150 cm de hauteur Manai. [26] Il s'agit de fixer une plaque circulaire en Plexiglas de 150 mm de diamètre et de 4 mm d'épaisseur ancrée dans le béton à l'aide de 4 boulons de 35 mm de longueur chacun, sur la surface du béton frais. On met au contact de la plaque en Plexiglas l'aiguille de 24 mm de longueur d'un comparateur de détection de déplacement qui est caractérisée par une précision de 0.2  $\mu\text{m}$ . on note la variation du tassement au cours du temps jusqu'à la stabilisation du mouvement (prise de béton).

On détermine ainsi le tassement relatif  $T(\%)$  par division de la valeur maximale du tassement ( $T_h$ ) sur la hauteur de la colonne ( $h$ ).

$$T(\%) = \frac{T_h}{h} \times 100 \quad \dots\dots\dots (II.3)$$

Cet essai, nous permet également de mesurer le volume d'eau de ressuage externe apparu à la surface supérieure du béton.

Une fois durcies, les colonnes de béton peuvent être sciées verticalement afin d'évaluer la répartition des gros granulats. Ceci nous donne une idée sur la résistance à la ségrégation du béton.

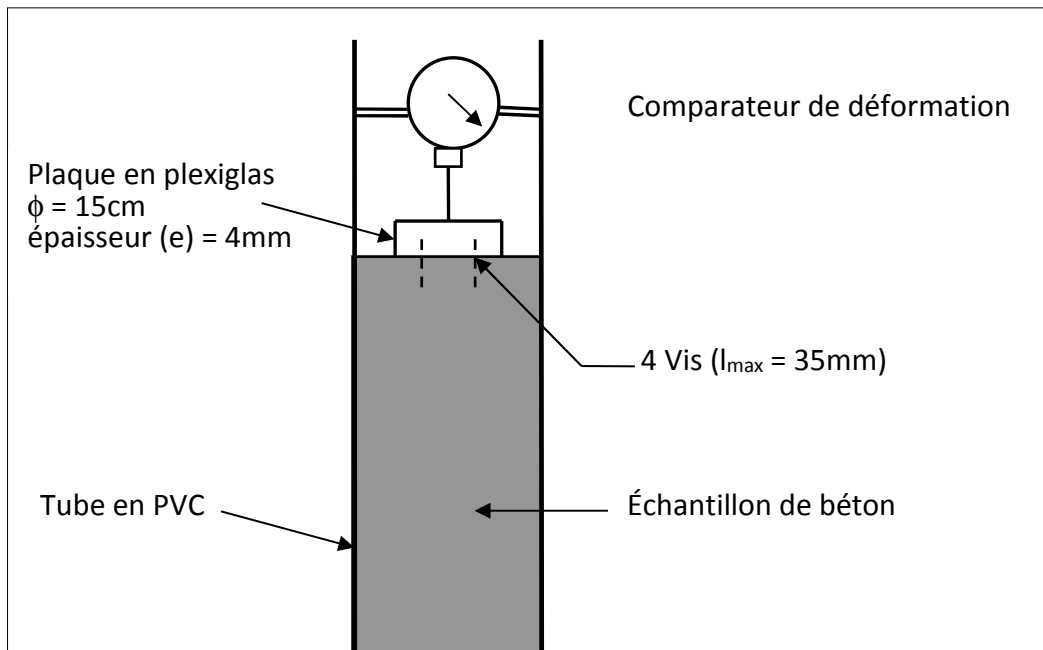


Figure II.10 - Essai du tassement, Manai. [26]

### II.6.4. Ségrégation dynamique

Pour la ségrégation dynamique, comme pour la ségrégation statique, il n'existe pas d'essais conventionnels. De ce fait, plusieurs systèmes ont été développés.

Les essais pour caractériser la résistance à la ségrégation dynamique ont pour but d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée.

Ils peuvent par exemple mettre en évidence des phénomènes de blocage de l'écoulement par formation de voûtes avec les granulats.

#### II.6.4.1. Essai du tube en U

On remplit la partie R1 de béton puis on ouvre la trappe. Après écoulement du béton, on mesure la hauteur de remplissage dans la partie R2. Pour un BAP, elle est souvent supérieure à 30 cm.

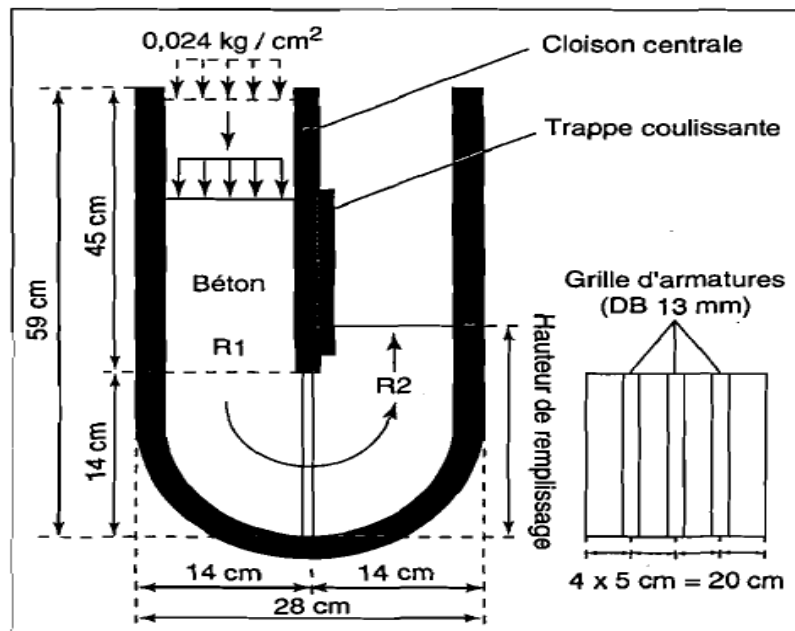


Figure II.11 - Essai du tube en U (Mitsuka et al) [1]

#### II.6.4.2. Essai de la capacité de remplissage (Essai du caisson)

Il s'agit de remplir à débit constant le caisson jusqu'à ce que la partie X atteigne 22 cm et on estime l'aptitude de remplissage du béton par le rapport  $A / (A+B)$  (%). Avec **A** : rempli par le béton et **B** : non rempli par le béton. Un béton peut être considéré comme BAP si le rapport est supérieur à 60%. Le volume de béton BAP nécessaire pour réaliser cet essai de l'ordre de 35 litres.

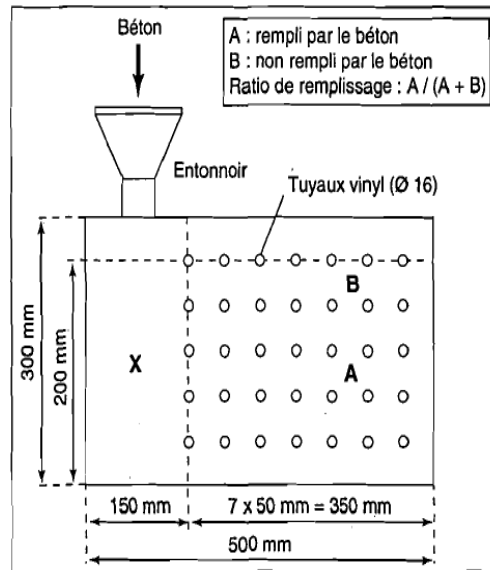


Figure II.12 - Essai du caisson, d'après Yurugi et al. [25]

#### II.6.4.3. Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis des risques de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier.

L'essai consiste à prélever, juste après le malaxage, un échantillon de 10 litres de béton dans un sceau. Il faut couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation ; après 15 minutes, on verse au centre d'un tamis de 5 mm d'ouverture un poids de béton égal à  $4.8 \text{ kg} \pm 0.2 \text{ kg}$ , à partir d'une hauteur de chute de  $50 \pm 5 \text{ cm}$ ; après 2 minutes, on calcule le poids de la laitance passée au tamis, ce qui nous permet de qualifier les BAP vis-à-vis des risques de ségrégation et de ressuage.

A. Boucetta et M. Behim [27] ont trouvé qu'un BAP avec fillers de brique (FB) développe une bonne stabilité par rapport à un BAP ordinaire à faible volume de pâte ( $320 \text{ l/m}^3$ ). Selon la figure ci-dessous, la stabilité des BAP augmente avec l'augmentation de la teneur en fillers, d'où l'importance du volume de pâte et le rôle des additions pour limiter les risques de ségrégation et de ressuage.

Cependant l'augmentation du volume de pâte au-delà d'une certaine quantité peut entraîner une importante résistance à la ségrégation, le mortier devient trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis et peut causer une mauvaise qualité de parement.

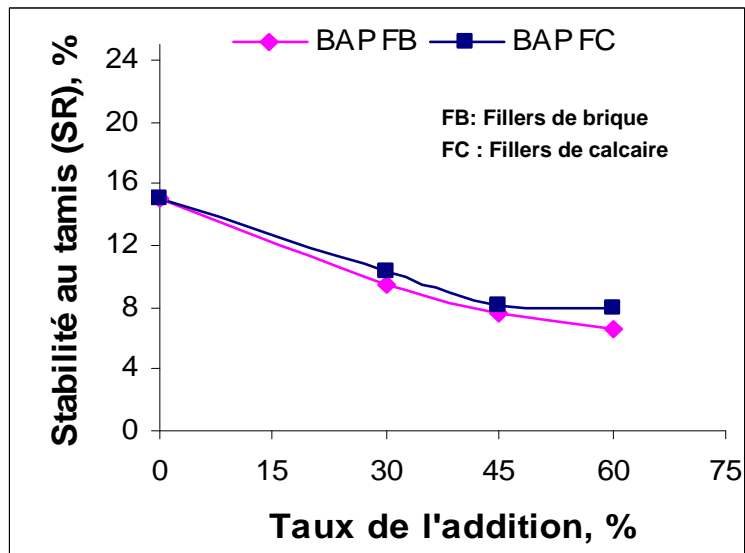


Figure II.13 - Influence du dosage en addition sur la stabilité au tamis des BAP [27]

Z. Abib [17] a trouvé que la stabilité d'un BAP augmente avec la diminution du rapport volumétrique Sable/pâte (figure II.14).

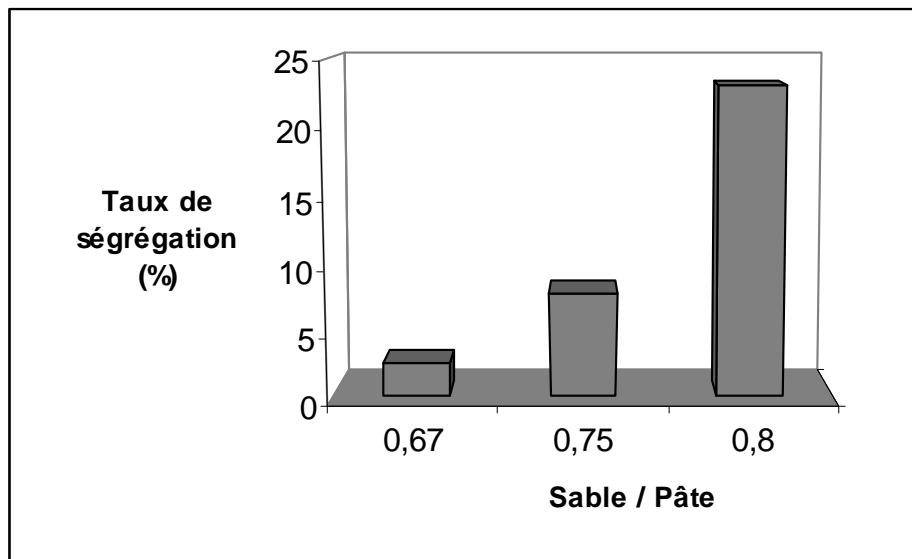


Figure II.14 - Effet de la variation du rapport sable/pâte sur la résistance à la ségrégation

### II.6.5. Ségrégation statique

Il est important d'évaluer la capacité du béton à rester homogène une fois mis en place, c'est à dire la résistance à la ségrégation statique des granulats qui ont une répartition hétérogène.

Les caractéristiques du béton telles que la résistance mécanique, le retrait et la qualité du parement peuvent être considérablement réduites dans un béton autoplaçant possédant une bonne résistance à la ségrégation.

On mesure l'enfoncement d'une bille simulant un granulat de diamètre de 20 mm dans un cylindre de béton (16 x 32) cm. La bille est reliée au balancier par une tige rigide et sa densité est ajustée par un contre poids.

La bille est initialement enfoncée de sa hauteur dans le béton puis lâchée. Plus le temps nécessaire pour que la bille s'enfonce dans le béton (de 6 cm pour les études du LCPC) est faible, plus la tendance à la ségrégation du matériau est élevée.

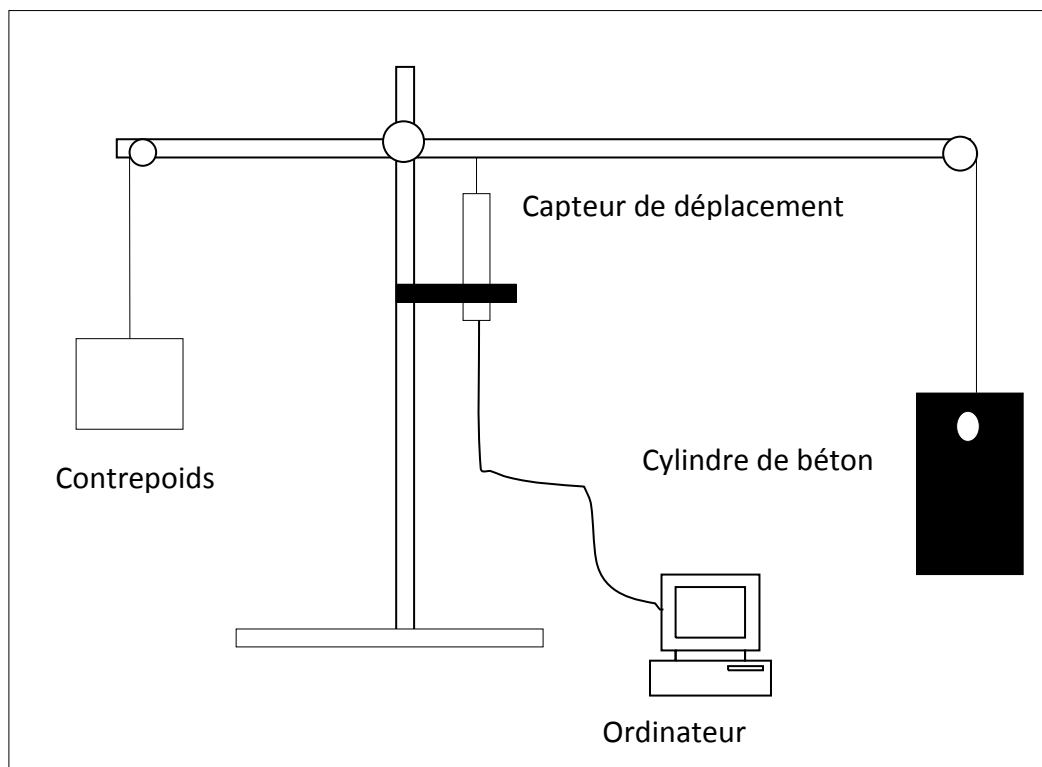


Figure II.15 - Essai à la bille [25]

## II.7. OPTIMISATION DES BAP

L'optimisation des performances d'un béton consiste à minimiser la teneur en eau tout en gardant une maniabilité suffisante à l'état frais afin de faciliter sa mise en place.

La diminution de la teneur en eau conduit généralement à de bonnes caractéristiques mécaniques telles que des résistances plus élevées, un retrait et un fluage plus faible et une durabilité accrue.

Pour confectionner un béton autoplaçant, on utilise souvent des adjuvants chimiques (superplastifiants, réducteurs d'eau, agents colloïdaux et agent entraîneur d'air) et des ajout minéraux (fumée de silice, laitier, cendre volante et filler calcaire). Ce type de béton se caractérise par la diversité des matériaux cimentaires qu'il contient par rapport aux bétons ordinaires. Le béton autoplaçant contient également des proportions bien précises de gros granulats pour faciliter la déformabilité de la matrice.

L'étude de l'influence des différents adjuvants chimiques et ajouts minéraux et des dosages de gros granulats sur les propriétés des bétons fluides à l'état frais et durci a attiré l'attention de plusieurs chercheurs. Dans la partie suivante nous exposons les résultats de quelques recherches sur l'optimisation et le développement de formulation de BAP du point de vue de la teneur en granulats et en ajouts chimiques et minéraux.

Les objectifs principaux de ces recherches étaient l'amélioration de la rhéologie, des performances mécaniques et de la durabilité des bétons fluides.

### II.7.1. Optimisation de la teneur en gros granulats

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer les quantités et la taille optimales des gros granulats capables de donner un maximum d'ouvrabilité au béton. Ces études ont analysé l'impact de cette optimisation du béton à l'état frais sur les propriétés des bétons durcis.

Selon Yurugi et coll. [28], le volume de gros granulats dans le béton est le facteur le plus important pour le contrôle de la maniabilité et de la capacité de remplissage (plus la teneur en gros granulats augmente, plus la capacité de remplissage diminue).

Ayant comme critère de base qu'un BAP devrait avoir un diamètre d'étalement compris entre 600 et 700 mm et plus de 60% de capacité de remplissage, ils ont en

effet réalisé des formulations de béton autoplaçant qui contenaient 30 à 40% du filler calcaire, un agent colloïdal à base de naphthalène (dosage de 2.6 à 4% de la masse du liant), des granulats concassés ayant un diamètre maximum de 20 mm et un rapport E/L = 0,3 à 0,35. Le diamètre d'étalement obtenu variait de 560 à 730 mm

Okamura et coll. [14], mentionnent que le premier point dont il faut tenir compte lors de la formulation d'un BAP est de limiter la teneur en gros granulats, car les bétons frais à faibles dosages en granulats se caractérisent généralement par une haute résistance à la ségrégation. Ils rapportent que les collisions et les frictions entre les gros granulats augmentent près des obstacles et l'énergie requise pour l'écoulement est consommée par les contraintes internes, ceci provoque le blocage. Ils ont montré que la probabilité de blocage devient négligeable pour des volumes de gros granulats inférieurs à 50% du volume des solides.

Khayat et coll. [29] ont déterminé les quantités optimales en gros granulats et en sable capables d'améliorer la fluidité des mélanges de béton en présence d'un agent colloïdal et de superplastifiant.

La quantité des granulats était de l'ordre de 300 l/m<sup>3</sup> avec une teneur de 70% de granulats de diamètre 14 mm et 30% de granulats de diamètre maximum 20 mm, quant à la quantité du sable, elle correspondait à un rapport volumique sable/pâte de 0.6.

Il est à noter que ces bétons contiennent 7,5 à 13 kg/m<sup>3</sup> de superplastifiant (naphthalène). La résistance à la compression au jeune âge est plus importante avec les hautes teneurs de remplacement en pouzzolanes (50 kg/m<sup>3</sup> de fumées de silice).

### **II.7.2. Optimisation des teneurs en ajouts minéraux**

L'utilisation des ajouts minéraux est intéressante sur le plan rhéologique, car ils sont d'une part moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet d'avoir un temps prolongé d'ouvrabilité et d'autre part, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granulométries différentes permet aussi d'améliorer la granulométrie totale des particules fines ainsi que celle du mélange de béton.

Ceci favorise l'augmentation de la stabilité et l'accroissement de la déformabilité du béton, d'autre part, le grand volume de liant utilisé dans les bétons autoplaçants pour remplacer une partie de ciment contribue à la réduction de la chaleur d'hydratation et du retrait du béton.

Neto et coll. [1], rapportent que le filler calcaire réduit la demande en eau pour une maniabilité fixe, s'il est pur et finement broyé, tandis que Gjorv [1], a montré que pour des dosages en ciment de 200, 300 et 400 kg/m<sup>3</sup>, on peut ajouter jusqu'à 6% de fumée de silice sans augmenter le seuil de rigidité du béton avec une amélioration de la viscosité plastique. Des dosages supérieurs inversent le phénomène par augmentation des frictions entre les fines, et le béton devient très collant et très cohésif.

Khayat et Guizani, [29] indiquent qu'une matière pouzzolanique telle que la cendre volante (particules sphériques et lisses) améliore la déformabilité du béton.

Le laitier est supposé améliorer la maniabilité (particules vitreuses). La fumée de silice augmente la résistance à la séparation des constituants du béton et réduit significativement les phénomènes de ressuage et de ségrégation.

Miura et coll. [30] ont étudié l'influence des ajouts cimentaires sur la maniabilité du béton en réalisant des formulations où la teneur en eau et la nature de l'ajout sont les principaux paramètres à analyser. Leurs résultats ont confirmé l'importance des remplacements en ajouts sur l'ouvrabilité et la déformabilité des bétons. À titre d'exemple, des hautes teneurs en laitier (50%) ou en cendre volante (30%) ont permis d'améliorer beaucoup la fluidité des bétons contenant 140 l/m<sup>3</sup> de liant, 160 l/m<sup>3</sup> d'eau et un rapport volumique sable/granulats de 51.5%. La teneur en superplastifiant (naphtalène) est maintenue constante à 2.1% de la masse du liant.

Dans le même cadre de cette étude, on a fait varier la teneur en masse cimentaire de 130 à 175 l/m<sup>3</sup> et on a mesuré la vitesse d'écoulement par un essai d'écoulement en L renforcé avec des armatures. On a constaté une tendance à la ségrégation pour des teneurs en liant de 130 l/m<sup>3</sup> (étalement de 550 mm), à partir d'une teneur de 145 l/m<sup>3</sup> les problèmes de ségrégation commencent à disparaître et la vitesse d'écoulement s'accroît.

D'autres chercheurs [1] ont développé des formulations de bétons fluides (étalement de 650 ± 30 mm) qui présentaient de faibles pertes d'étalement au cours du temps (maximum 30 mm après 60 min). Ces bétons de rapport E/C = 0.55 ± 0.05 contiennent du filler calcaire, un volume de pâte supérieur à 300 l/m<sup>3</sup>, des granulats concassés de diamètre maximum 20 mm, un rapport volumique sable/granulats de 51 ± 1%, 8 kg/m<sup>3</sup> de superplastifiant (naphtalène) et 3 kg/m<sup>3</sup> d'agent colloïdal à base de polyacrylate.

Les résultats de ces essais ont montré que pour un remplacement de 20% du volume des granulats par le filler calcaire, on obtient la meilleure fluidité, de même qu'ils ont obtenu de bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage.

Les mêmes bétons ont été étudiés vis-à-vis du retrait à une température de 20°C et une humidité relative de 60%.

On constate que les bétons contenant des agents expansifs, des réducteurs de retrait et du filler calcaire présentent une réduction très significative du retrait (inférieur à 400  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) et moins de fissurations aux surfaces.

Sur le plan mécanique, Certains chercheurs [1] ont trouvé que les résistances à la compression de certains BAP (étalement de  $650 \pm 50$  mm) sont en général supérieure à 40 MPa après 28 jours parce que ces bétons contiennent une grande teneur en fines ( $500 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) composées essentiellement de ciment portland ( $200$  à  $350 \text{ kg}/\text{m}^3$ ), ( $100$  à  $200 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) de laitier et ( $50$  à  $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) de cendre volante.

La résistance est aussi élevée grâce aux rapports E/C relativement bas (0.35 et 0.40). Il est à noter que ces bétons contiennent  $9.6 \text{ kg}/\text{m}^3$  de superplastifiant (naphtalène) et  $1 \text{ kg}/\text{m}^3$  d'agent colloïdal (polysaccharide). La résistance à la compression à jeune âge est plus faible avec les hautes teneurs de remplacement en pouzzolanes ( $200 \text{ kg}/\text{m}^3$  de laitier et  $100 \text{ kg}/\text{m}^3$  de cendre volante) qui réagissent lentement. Toutefois, les mélanges qui présentent une teneur élevée en ciment ( $350 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) ont eu des résistances plus élevées.

Awad et coll. [31] ont développé des bétons BAP de 650 mm d'étalement ( $E/L = 0.22$  à  $0.37$ ) qui ont atteint une résistance à la compression de 25 MPa à 24 heures et 90 MPa à 28 jours.

Ces bétons contiennent différents dosages en pouzzolanes comme la fumée de silice (de  $10$  à  $45 \text{ kg}/\text{m}^3$ ), de la cendre volante (de  $44$  à  $121 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) et du laitier (de  $48$  à  $157 \text{ kg}/\text{m}^3$ ), ils ont également utilisé un superplastifiant à base de naphtalène avec des dosages variant de 1.07 à 1.43% de la masse du liant, et des combinaisons de granulats concassés de diamètre maximum de 10 mm (dosage :  $360$  à  $455 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) et 20 mm (dosage :  $530$  à  $670 \text{ kg}/\text{m}^3$ ).

### II.7.3. Optimisation des teneurs en ajouts chimiques

L'utilisation des superplastifiants et des agents colloïdaux permet aussi d'améliorer la déformabilité et la stabilité des BAP. Les superplastifiants permettent de réduire la teneur en eau et par conséquent, améliorent la stabilité et les propriétés mécaniques. Les superplastifiants agissent par adsorption à l'interface solide-eau, ce qui permet aux grains de ciment d'acquérir des charges identiques et de créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Ceci permet de libérer une partie de l'eau piégée par les grains de ciment flocculés et diminue ainsi les frictions intergranulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton.

Les agents colloïdaux améliorent la viscosité et diminuent la ségrégation et le ressuage dans les bétons ; par contre, ils augmentent la demande en eau du mélange et leur utilisation nécessite la présence de superplastifiants. Les agents colloïdaux maintiennent aussi l'uniformité du béton au cours de sa déformation en évitant l'accroissement local des contraintes dû au rapprochement des gros granulats.

Au niveau de la stabilité, les bétons contenant des superplastifiants et des agents colloïdaux présentent moins de ressuage. Emborg. [31] a développé des BAP d'étalement de 500 à 600 mm de rapport E/C de 0.60 et contenant 30% de remplacement massique du ciment par du laitier avec différents dosages de mélanges (A et B) de superplastifiant et d'agent colloïdal combinés (4.62% de type A et 4.62% de type B de la masse des liants).

Ils ont enregistré un ressuage de 0.3 ml/cm<sup>2</sup> (essai réalisé sur un cylindre de 15 cm de diamètre et hauteur de 30 cm, le moyen de mesure n'est pas déterminé).

Khayat et Guizani [29] ont montré aussi que la stabilité du béton s'accroît avec l'augmentation de la teneur en agent colloïdal. On assiste à une diminution du taux de ressuage externe et du tassement à l'état frais du béton.

Les agents colloïdaux permettent aux bétons d'avoir un excellent comportement au lessivage par adsorption de certaines molécules d'agents colloïdaux sur les grains de ciment, ce qui évite le mélange de l'eau avec le béton frais.

Khayat [29] rapportent que l'écoulement visqueux permet de réduire la vitesse à l'interface eau- béton et on assiste donc à une amélioration significative de la résistance au lessivage.

Une étude faite par Yurugi et coll. [28] sur un mortier avec différents dosages en agent colloïdal à base de glucose (dosage variant de 0 à 0.05% du volume de l'eau) et de superplastifiant (dosage variant de 1.2 à 3% de la masse de liant) a relevé que le ressuage était nul quand la teneur en agent colloïdal dépasse 0.03% (les caractéristiques du mortier n'ont pas été spécifiées).

Fukute et coll. [32] ont développé un BAP (E/C = 0.48) fait avec un ciment à base de laitier et ont utilisé un agent colloïdal fait avec de la cellulose (dosage de 0.3% de la masse de l'eau; un superplastifiant à base de polycarboxilique (dosage de 3% de la masse de ciment) et un agent entraîneur d'air (dosage de 5.8 kg/m<sup>3</sup>), les gros granulats ont un diamètre maximum de 20 mm.

Ils ont trouvé les résultats suivants : un diamètre d'étalement de 650 ± 50 mm, une vitesse d'étalement horizontal inférieure à 3.3 cm/s et une différence de hauteur dans le « Box test » de 2 cm. L'étude de la résistance à la ségrégation pour le cas d'étalement a montré que le béton développé est uniforme même après un étalement de 7.2 m dans un coffrage de dimensions (2 × 1.1 × 7.2) m. Ceci est attribué à la combinaison de l'agent colloïdal et du superplastifiant qui améliorent respectivement la déformabilité et la résistance à la ségrégation du béton.

Le temps de prise initial et final ont été prolongés de 2 à 3.5 heures par rapport au béton témoin ordinaire (E/C = 0.55 ; prise initiale à 6 heures). Ceci est dû à la présence de l'agent colloïdal et du superplastifiant.

## II.8. METHODES DE FORMULATION

Théories et expériences se sont succédé au cours du siècle dernier, qui ont jeté les bases des méthodes de formulation des squelettes granulaires des bétons. Il se dégage aujourd'hui un certain consensus sur le sujet. En premier lieu, les courbes granulaires continues apportent plus de robustesse aux mélanges même si elles présentent un potentiel de compacité plus faible et l'étendue granulaire est le paramètre déterminant pour optimiser la compacité (fraction solide dans le volume). Les modèles théoriques les plus avancées permettent aujourd'hui de calculer la capacité d'empilement d'un jeu de matières premières solides.

Citons le modèle d'empilement compressible développé par F. De Larrard [33], qui introduit des interactions entre particules (effet de paroi et effet de desserrement), (figure II.16) et permet de simuler la compacité d'un mélange en partant de la

compacité propre de chaque fraction, en fonction de l'énergie de compactage mise en œuvre.

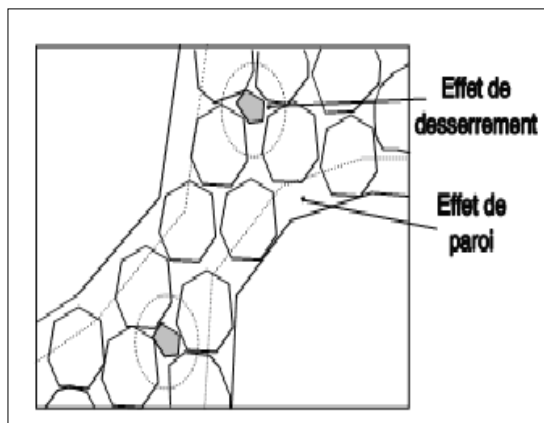


Figure II.16 - Interaction entre particules d'un empilement [33]

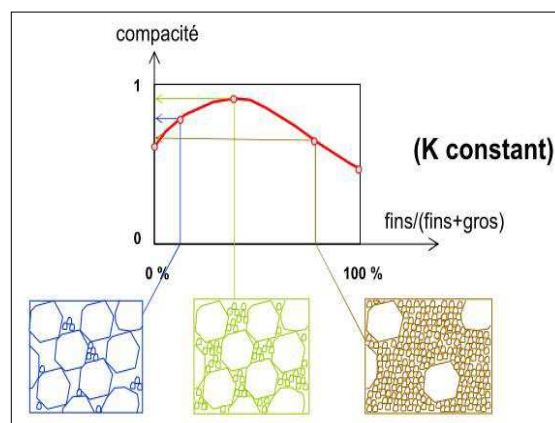


Figure II.17 - Optimum de compacité dans un mélange binaire [33]

Ainsi, au cours des dernières décennies, les méthodes de formulation ont évolué au-delà d'une simple considération de courbe granulométrique idéale (supposée permettre l'obtention d'une compacité optimale, par exemple les méthodes de Faury, Dreux-Gorisse, etc....., vers une estimation de la compacité de l'empilement (figure II.17). Cette évolution est significative puisqu'elle permet d'estimer la porosité résiduelle du mélange et donc d'envisager une prédiction des propriétés rhéologiques des bétons dans son état de suspension.

L'un des apports les plus significatifs de ces avancées scientifiques réside dans la notion d'optimisation d'un squelette granulaire vis-à-vis des performances rhéologiques ciblées. En effet, alors que traditionnellement, les méthodes de formulations considéraient que le squelette le plus compact donnait le meilleur béton, il est rapidement apparu que pour viser des performances rhéologiques telles que celles des bétons autoplaçants, il ne faut plus se placer à l'optimum de compacité.

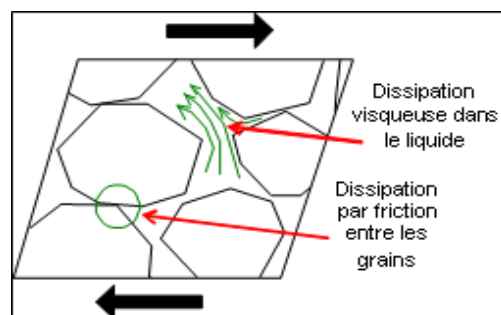
En effet, les bétons modernes se distinguent des bétons traditionnels dans le fait d'une part qu'ils recourent systématiquement à des adjuvants rhéologiques et, d'autre part, que le liant est devenu un mélange de ciment portland et de fines complémentaires. D'un point de vue fondamental, il est théoriquement possible de considérer toutes les particules solides, jusqu'aux plus fines (y compris les fines du sable), en terme d'empilement. Toutefois, dès lors que ces particules sont de tailles

microniques et, qui plus est, électriquement chargées, leur comportement en milieu aqueux devient complexe et génère des effets de floculation. Il n'est alors plus suffisant de considérer les courbes granulométriques de chaque composant pour anticiper les empilements. C'est d'ailleurs le rôle des adjuvants rhéologiques que de favoriser la dispersion de ses particules fines par des effets stériques.

D'un point de vue pratique, il a toujours été d'usage et cela reste commode de séparer d'une part le squelette granulaire proprement dit, empilement du sable et des gravillons, et d'autre part la pâte constituée du reste, ciment, fines, eau et adjuvants. Ce faisant, la pâte vient desserrer le squelette granulaire pour viser une consistance. Il est aisé de concevoir que le volume de pâte peut être fractionné en un volume de pâte qui va initialement remplir les vides résiduels du squelette granulaire, plus un volume de pâte qui va créer l'effet de desserrement (suspension du squelette granulaire dans la pâte).

C'est à ce niveau qu'intervient la notion de compacité optimale du squelette granulaire. En effet, le volume de pâte de remplissage est d'autant plus faible que le squelette granulaire est compact. Toutefois, cette optimisation de la compacité du squelette granulaire conduit en général à des empilements favorisant les gros granulats tant en taille qu'en fraction volumique (le fameux rapport gravillons/sables bien connu des méthodes de formulations traditionnelles).

Le cisaillement de ce béton lors de sa mise en œuvre va alors nécessiter de faire passer des gros granulats les uns sur les autres et conduit alors à des blocages locaux, source de seuil en terme de comportement rhéologique (figure II.18).



**Figure II.18 - Mécanismes de dissipation lors de l'écoulement [33]**

Afin de limiter ces effets néfastes, il est d'usage de réduire la taille du plus gros granulat mais également de favoriser des empilements tels que chaque taille de grain est desserré par les tailles de grains inférieures. Cet empilement n'est plus l'empilement le plus compact et donc va nécessiter un volume de pâte de

remplissage accru mais en contrepartie, moyennant un volume de pâte d'écartement suffisant, un tel béton possèdera des propriétés rhéologiques souhaitées. Il faut également noter qu'il devient alors possible de viser des rhéologies fluides sans diluer en excès la pâte de ciment mais par effet de desserrement, ce qui permet alors de maîtriser la stabilité du mélange (ressuage, ségrégation) mais également les résistances et la durabilité.

Les concepts précédents sont à la base de la formulation des bétons autoplaçants. En effet, si l'on se réfère aux règles traditionnelles, pour augmenter l'ouvrabilité d'un béton, considérant un squelette solide « optimisé » (incluant toutes les particules solides), il faut agir sur le dosage en eau. Notons que l'on retrouve cette règle indirectement dans la méthode de Dreux qui, après avoir défini le rapport E/C pour la résistance, donne accès au dosage en ciment donc en eau selon l'affaissement visé. Nous avons expliqué la limite d'une telle approche et seule une démarche rigoureuse d'optimisation du squelette d'un point de vue rhéologique permet d'atteindre la cible. En desserrant le squelette granulaire avec la pâte, la rhéologie va dépendre du niveau de desserrement mais également de la viscosité de la pâte elle-même. Et c'est à ce niveau que rentrent en jeu les adjuvants tels que les superplastifiants. En effet, ces adjuvants permettent de maintenir un état défloculé pour les fines particules pour autant que le malaxage (aidé par la présence des granulats) ait cisailé suffisamment les floccs pour les briser. En conséquence, la viscosité de la pâte de ciment va au premier ordre être fonction de l'étendue granulaire des fines particules et de leurs fractions volumiques (attention, il s'agit bien de fraction volumique et non pas de fraction massique, les fines complémentaires ayant des densités différentes de celles du ciment portland).

A ce niveau, une certaine complexité peut surgir dans la mesure où l'efficacité d'un adjuvant superplastifiant peut être variable d'un ciment à un autre et par suite, seuls des essais permettent d'optimiser ces couples, même si ces mécanismes tendent à être de mieux en mieux maîtrisés (la synthèse de superplastifiants avec des structures bien définies ont permis de comprendre comment les structures de ces polymères interagissent physico-chimiquement avec du ciment) [34]. Notons que pour agir sur la viscosité de façon plus directe, il est possible d'avoir recours à des agents viscosants, mais cela introduit des difficultés supplémentaires devant la diversité des produits possibles.

### II.8.1. Approche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Au LCPC, T. Sedran et F. De Larrard ont développé un modèle mathématique à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire sec avec une précision inférieure à 1% à partir des caractéristiques des constituants ci-après :

- Les distributions granulaires
- Les proportions du mélange
- La compacité propre
- La densité apparente.

Ce modèle permet également de prendre en compte quantitativement l'effet de confinement qu'exercent les armatures et le coffrage sur la compacité du squelette d'un béton et donc l'ouvrabilité de ce béton. Ce modèle a été utilisé avec succès pour prévoir l'évolution de l'ouvrabilité de différents bétons, (tels que les bétons à hautes performances, béton compacté au rouleau) en fonction de leur composition [35].

Ce modèle mathématique est particulièrement intéressant pour :

- ❖ Comprendre et évaluer l'influence des différents constituants sur les propriétés des bétons ;
- ❖ Choisir le meilleur parti des matériaux pour les propriétés des bétons que ce soit à l'état frais telle que l'ouvrabilité et la résistance à la ségrégation ou à l'état durci telle que les résistances à la compression et à la traction, retrait, fluage ;
- ❖ Prendre en compte la spécificité et la nature d'un projet lors de la formulation de béton (béton pompé, coulage en zone très ferrillée).

Les auteurs proposent la démarche suivante à partir d'un cahier des charges, pour la formulation des bétons autoplaçants sans agents de viscosité.

Le cahier des charges exige les critères suivants :

- ✚ Étalement au Flow test compris entre 600 et 700 mm ;
- ✚ La viscosité plastique doit être d'une part inférieure à 200 Pa.s, permettant d'avoir un coulage rapide sur chantier et d'autre part supérieure à 100 Pa.s pour éviter la ségrégation.

Pour tout projet deux paramètres sont toujours nécessaires à connaître :

1. La résistance à la compression à 28 jours.
2. L'environnement de bétonnage traduisant un confinement potentiel. Pour cela, Il faut tenir compte de l'effet de paroi (espacement des armatures par exemple).

Le choix des matériaux sur la base des ressources locales devra être réalisé et les caractéristiques suivantes devraient être connues :

- ✦ La compatibilité ciment–superplastifiant.
- ✦ La compatibilité du superplastifiant avec un agent retardateur.
- ✦ La nature des additions minérales (filler calcaire, cendres volantes, laitiers, fumée de silice,...) nécessaires pour limiter la quantité du liant.

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- 1) Une proportion de liant est fixée à priori (par exemple 70% de liant et 30% de filler). Le choix des fillers sera en fonction des matériaux locaux disponibles.
- 2) Détermination du dosage en saturation du superplastifiant
- 3) Détermination du besoin en eau de ce mélange en présence de superplastifiant. Cette grandeur donne une mesure indirecte de la compacité, valeur nécessaire pour entrer dans le programme du modèle de suspension solide.
- 4) Les calculs sont effectués avec un logiciel en tenant compte du confinement (effet de paroi). La viscosité est fixée d'une manière arbitraire à  $5 \cdot 10^4$  Pa.s (valeur correspondante aux bétons autoplaçants selon l'expérience du LCPC). La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant filler est maintenue constante. Les proportions granulats / pâte liante sont optimisées.
- 5) Le béton est fabriqué (10 à 15 l) et sa teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée.
- 6) Le dosage en superplastifiant est ajusté afin d'obtenir la valeur d'étalement souhaitée, ceci n'a pas d'influence sur la viscosité plastique. À ce niveau le béton obtenu répond aux critères rhéologiques de contrainte de cisaillement et de viscosité plastique.
- 7) Enfin, l'évolution du comportement rhéologique doit être étudiée, l'ajout d'un retardateur de prise s'impose dans le cas d'un raidissement du béton.

Malgré le travail considérable effectué au LCPC sur les problèmes de rhéomètre des bétons de consistance plastique à fluide, il est encore nécessaire d'étendre les modèles reliant la composition des mélanges et leur comportement rhéologique

Par ailleurs les formulations proposés doivent être confrontées à des expérimentations en vraie grandeur afin d'appréhender les problèmes de ségrégation.

### II.8.2. L'Approche Japonaise

La méthode de formulation des bétons autoplaçants est la suivante :

- La teneur volumique en gravillons du béton est fixée à 50% du volume de solide. Selon les auteurs [35], ce pourcentage permet de prévenir le risque de blocage si le mortier est correctement formulé.
- Pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume de sable est fixé à 40% du volume total du mortier. L'estimation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%. Ces mortiers sont caractérisés par deux essais :

- ✓ Un essai d'étalement au cône
- ✓ Un essai d'écoulement à l'entonnoir

Les auteurs en tirent deux grandeurs :

Avec :

1. L'étalement relatif :

$$\Gamma_m = \frac{r_1 r_2 - r_0^2}{r_0^2} \dots\dots\dots (II.4)$$

2. La vitesse relative d'écoulement :

$$R_m = \frac{10}{t} \dots\dots\dots (II.5)$$

- ❖  $r_1$  et  $r_2$  : les diamètres d'étalement selon deux médianes et  $r_0$  le diamètre inférieur du cône
- ❖  $t$  : est le temps d'écoulement à l'entonnoir exprimé en secondes.
- ❖  $\Gamma_m$  : représente la fluidité du mortier, (plus  $\Gamma_m$  est grand, plus le mortier est fluide)
- ❖  $R_m$  : représente la viscosité du mortier (plus  $R_m$  est faible, plus la viscosité est élevée). [35]

D'après l'expérience des auteurs, il faut avoir simultanément  $\Gamma_m = 5$  et  $R_m = 1$  pour obtenir un béton autoplaçant acceptable.

Les auteurs ont montré que pour un dosage en superplastifiant donné et pour différents rapports volumiques eau/poudre ( $V_w/V_p$ ), il y a une relation de linéarité entre  $R_m$  et  $\Gamma_m$ .

En conclusion, la formulation des bétons hyperfluides, qui se mettent en place sans vibration, est possible et comprise. Les méthodes classiques basées sur des notions d'optimisation de la compacité ne sont pas caduques mais elles ne permettent pas de prendre en compte de nouveaux leviers. Les points majeurs à retenir pour les bétons autoplaçants sont les suivants :

- ◆ L'optimum de compacité du squelette granulaire n'est pas intrinsèque et dépend de l'énergie de compactage mise en œuvre et de la rhéologie visée.
- ◆ Par principe, un béton est une suspension et le desserrement du squelette par la pâte de ciment permet de viser la rhéologie souhaitée.
- ◆ La rhéologie de la pâte elle-même est à l'origine des performances du béton frais, tant d'un point de vue aptitude à être mis en œuvre que robustesse et capacité du mélange à rester homogène.
- ◆ Pour ajuster la rhéologie de la pâte de ciment, les superplastifiants sont essentiels, en autant que l'énergie de malaxage permet de générer un état défloculé des fines, mais la fraction solide des fines ainsi que leur potentiel d'empilement est le paramètre de premier ordre.
- ◆ Cette fraction solide va intégrer les effets du ciment lui-même mais également des fines complémentaires (fines d'additions, fines du sables, ...), indispensables pour optimiser le volume de pâte et son comportement.

A ce niveau, il faut garder à l'esprit que les fines autres que le ciment ont généralement des densités plus faibles que le ciment portland et par conséquent, une substitution massique conduit toujours à une fraction volumique supérieure, ce qui impacte directement la viscosité de la pâte de ciment mais constitue un vrai levier de formulation.

## II.9. PERFORMANCES MECANIQUES DES BAP

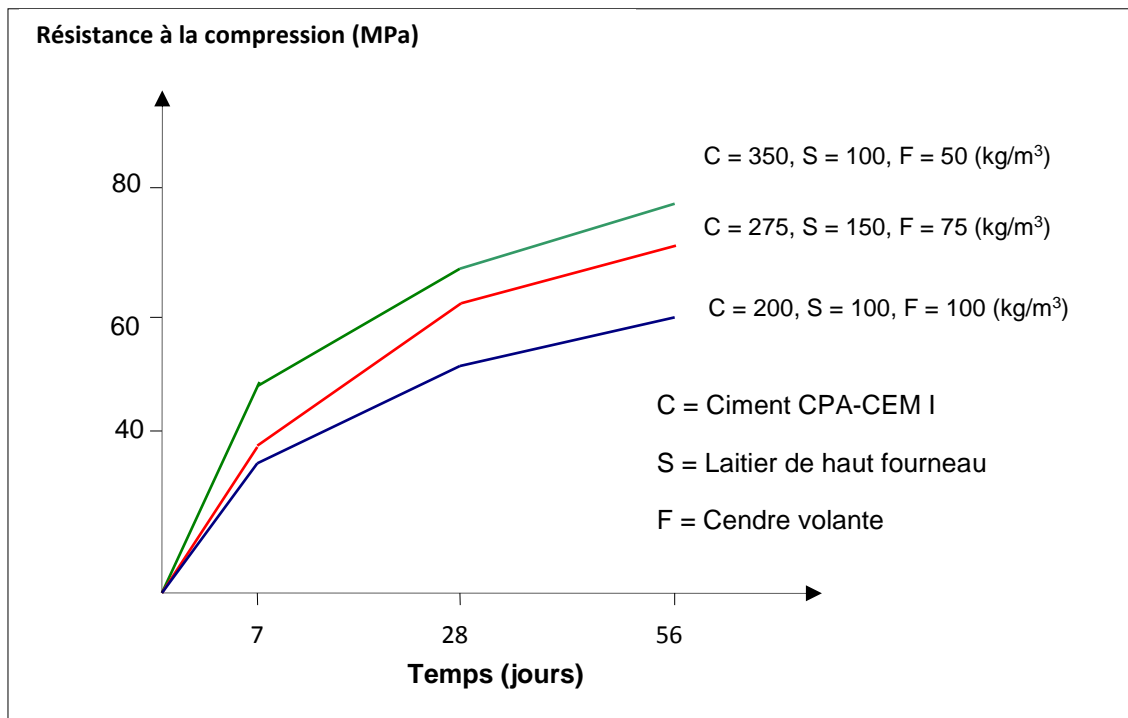
Les résistances mécaniques d'un BAP sont, comme pour la plupart des bétons directement liées à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment, elles dépendent aussi de la composition du liant. L'optimisation de ces

paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistances jusqu'à des BAP à hautes performances (80 à 100 MPa au 28<sup>ème</sup> jours).

L'évolution des résistances à la compression des BAP semble être voisine aux 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 car 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 adjuvant. En fonction des propriétés pouzzolaniques des additions, les résistances mécaniques des BAP peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours.



**Figure II.19 - Variation des résistances mécaniques en compression de BAP en fonction de la composition du liant, d'après Hayakawa et al [25]**

Dans des recherches précédentes [17], des essais comparatifs sur trois compositions de bétons autoplçants ont été réalisés (BAP1, BAP2 et BAP3). Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la teneur en fumée de silice améliore considérablement la fluidité et la stabilité du BAP (tableau II.4) et développe

les meilleures performances mécaniques en matière de résistances à la compression (figure II.20) et à la traction par fendage (figure II.21).

La 3<sup>ème</sup> composition de BAP (10% de FS et 3% de SP) a développé les meilleures performances rhéologiques, alors qu'il a développé les performances mécaniques qui le classe comme béton à hautes performances (BAP HP) [17].

Ces bons résultats sont principalement obtenus grâce à l'homogénéité et la bonne répartition entre les granulats de la pâte liante.

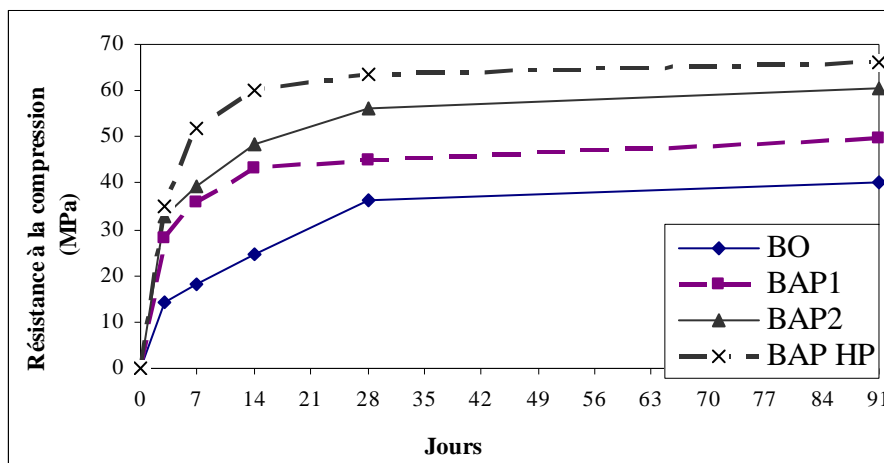
Cette homogénéité est assurée par la présence du superplastifiant qui disperse l'empilement des grains de ciment et les particules de fumée de silice. Ceci nous permet de créer une liaison intime entre la pâte liante et les granulats, ce qui donne un béton avec des bonnes caractéristiques rhéologiques à l'état frais et des caractéristiques mécaniques à l'état durci améliorées.

**Tableau II.3 : Compositions massiques des BAP et d'un béton ordinaire [17]**

Dosage (kg/m <sup>3</sup> )	Sable 0/3	Gravillon 3/8	Gravier 8/15	Ciment	FS	Eau	SP	E/C
Béton ordinaire (BO)	630	261	851	400	0	200	0	0,5
BAP 1	794	483	242	500	0	200	7,5	0,41
BAP 2	794	483	242	500	25	189	10	0,36
BAP HP	794	483	242	500	50	176	12,5	0,32

**Tableau II.4 : caractéristiques rhéologiques des BAP [17]**

Caractéristiques rhéologiques	BAP 1	BAP 2	BAP HP
Masse volumique apparente (t/m <sup>3</sup> )	2.315	2.330	2.407
Étalement (mm)	685	680	560
Valeur T500 (s)	3	5	6.5
Taux de ségrégation (%)	1.35	1.15	0.25



**Figure II.20 - Évolution de la résistance à la compression en fonction du temps [17]**

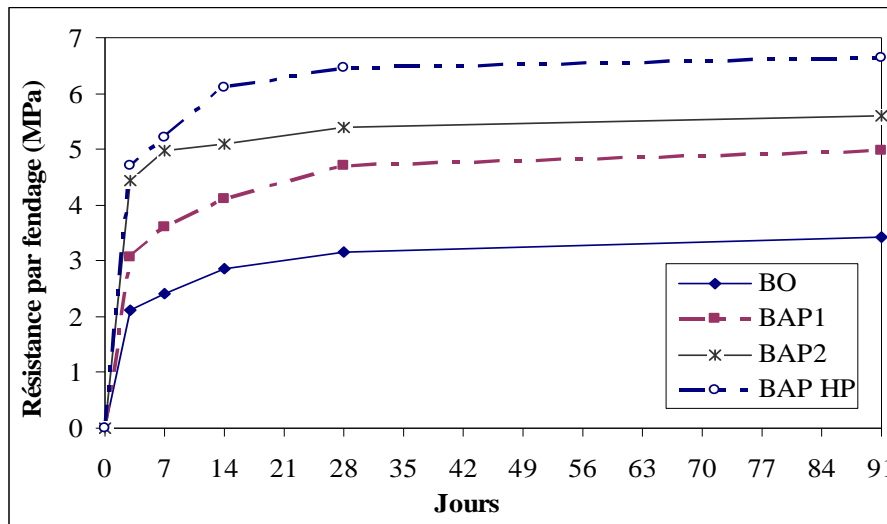


Figure II.21 - Évolution de la résistance à la traction par fendage en fonction du temps [17]

### II.10. EXEMPLES DE FORMULATIONS

Des exemples de formulations de BAP sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau II.5 : Différentes formulations de BAP [25]

	BAP 1	BAP 2	BAP 3	BAP 4	BAP 5
Ciment (C)	155	331	155	270	350
Eau (E)	160	175	159	196	170
Filler calcaire (F)	/	216	/	/	/
Laitier (LHF)	150	/	171	210	/
Cendre volante (CV)	200	/	202	210	/
Sable (S) 0/5	/	710	760	/	828
Gravillon (G) 5/16	/	875	874	/	877
Superplastifiant (I)	1.7	2.6	1.2	2.7	1.1
Agent de viscosité (I)	1	0.5	0.012	/	/
Entraîneur d'air (I)	/	/	/	0.05	/
Liant (I)	500	547	528	690	440
G/S	/	1.23	1.15	1.1	
E/L	0.32	0.32	0.30	0.41	0.39
Étalement au cône d'Abrams (mm)	680	600	570	700	600
Air occlus (%)	4.2	4	2	5.4	/

Liant = C + F + LHF + CV + autres additions en poudre.

Les dosages sont exprimés en (kg/m<sup>3</sup>), excepté pour les adjuvants.

**Tableau II.6 : Formulations de BAP et bétons ordinaires vibrés, réalisés et caractérisés par Persson [35]**

	BETON AUTOPLAÇANT				BETON TEMOIN			
	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BT1	BT2	BT3	BT4
<b>Ciment (C)</b>	500	400	340	260	389	360	285	250
<b>Eau (E)</b>	133	153	170	207	126	137	142	200
<b>Fumée de silice (FS)</b>	50	/	/	/	/	/	/	/
<b>Filler siliceux (F)</b>	50	145	165	185	106	68	33	/
<b>Sable 0/8</b>	880	790	840	1000	694	780	860	1000
<b>Gravillon quartzite 8/11</b>	600	305	285	395	135	270	330	300
<b>Gravillon quartzite 11/16</b>	800	620	525	270	660	560	420	600
<b>SP avec agent de viscosité</b>	5	2	1.2	1	/	/	/	/
<b>SP sans agent de viscosité</b>	/	/	/	7	3.6	2.6	.93	/
<b>Réducteur d'eau</b>	/	/	/	/	1.7	0.9	1.1	/
<b>Entraîneur d'air</b>	/	/	0.024	/	0.05	0.045	0.027	/
<b>Liant (L)*</b>	600	545	505	445	495	428	318	250
<b>G/S</b>	0.98	1.17	0.96	0.67	1.15	1.06	0.87	0.9
<b>E/L</b>	0.22	0.28	0.34	0.47	0.25	0.32	0.45	0.8
<b>Air occlus (%)</b>	1.3	1.4	3.5	1.9	12	12	13	1.2

Les dosages y compris ceux des adjuvants sont exprimés en (kg/m<sup>3</sup>).

(L)\*= C + FS + F

**Tableau II.7 : Exemple de formulation des BAP fabriqués en France [36]**

Constituants	Formulations (kg/m <sup>3</sup> )			
	BAP 1	BAP 2	BAP 3	BAP 4
<b>Ciment CPA 52.5</b>	350	452	372	430
<b>Sable 0/5</b>	860	544	891	750
<b>Gravillon 5/12</b>	790	290	306	860
<b>Gravillon 12/20</b>	/	554	585	
<b>Fumée de silice</b>	/	36	30	15
<b>Filler calcaire</b>	140	/	/	/
<b>Superplastifiant</b>	8	10	16	10
<b>Eau totale</b>	200	180	169	175
<b>f<sub>c28</sub> (MPa)</b>	37	57.3	64.8	65

### II.11. RETRAIT DES BAP

Entre la fabrication et le début de prise, le béton ne présente pas de cohésion et se trouve en phase dite plastique. Pendant cette période, le béton subit une contraction de volume appelée premier retrait ou retrait plastique. Celui-ci est le résultat de plusieurs phénomènes chimiques ou physiques qui ont lieu dans un matériau en perpétuelle évolution.

La prise constitue la transition entre le moment où le béton ne présente pas de cohésion et celui où il commence à devenir résistant. Avant la prise, les déformations libres du béton sont dues à la gravité, aux réactions d'hydratation et aux échanges thermiques avec le milieu extérieur.

Juste après le coulage, le béton est un mélange de particules solides, d'eau et d'air en suspension. Étant donné les différences de masse volumique, les grains de ciment et les granulats ont tendance à ségréger et contraignent l'eau et les bulles d'air à percoler vers la surface. Ce phénomène, appelé ressuage, engendre une couche d'eau superficielle et un tassement de la matrice cimentaire

Après la prise, les déformations du béton sont également d'origine hydrique (retrait endogène dû à l'autodessiccation) ou d'origine thermique (production de chaleur due à l'hydratation et échange thermique avec l'extérieur).

Le retrait que subit alors le béton durci, ou retrait total, concerne la masse entière des éprouvettes et des ouvrages. Il se décompose en trois formes de retraits distincts : le retrait thermique, le retrait endogène et celui de dessiccation [37].

- Le premier est provoqué par le refroidissement du béton suite à son échauffement dû aux réactions d'hydratation. Deux grandeurs sont à prendre en compte dans ce phénomène : la quantité totale de chaleur dégagée et la cinétique de production de chaleur. Cette dernière dépend de la composition du liant, du rapport E/L, tandis que la chaleur totale libérée découle, elle, de la masse de ciment et d'additions.
- Ensuite, apparaît le retrait endogène, dû à l'hydratation du ciment. Cette réaction se poursuit après la prise et s'accompagne d'une diminution de volume, comme évoqué ci-dessus. Le retrait endogène, ou d'autodessiccation, est la conséquence macroscopique de cette contraction d'origine chimique.
- Enfin, le retrait de séchage, ou de dessiccation, est lié au séchage du matériau à partir de sa surface extérieure. L'eau contenue dans les pores de la pâte de ciment (et retenue par des forces capillaires d'autant plus grandes que la

dimension de ceux-ci diminue) s'évapore vers le milieu ambiant, dont l'humidité relative est moindre, et crée une dépression qui contracte l'élément en béton.

D'autre part, le béton peut réagir avec le gaz carbonique contenu dans l'air (en présence d'humidité) et subir une quatrième forme de retrait appelé retrait de carbonatation [37].

En pratique, les échantillons testés en laboratoire pour évaluer les différents retraits du béton durci sont conditionnés selon deux méthodes différentes. L'une consiste à sceller les éprouvettes pour éviter tout départ d'eau et permettre ainsi aux réactions d'hydratation de se poursuivre. Ces échantillons permettront de mesurer le retrait endogène.

La deuxième laisse les éprouvettes libres de tout échange hydrique avec l'extérieur et conduit au retrait total. Conventionnellement, il est admis de soustraire le retrait endogène au retrait total pour obtenir le retrait de dessiccation, qui n'est pas une déformation concrètement mesurable.

La synthèse de documents présentée ici ne s'attache qu'aux retraits endogènes et de dessiccation. Ces deux formes de retrait hydrique sont susceptibles de différencier au mieux les BAP des bétons vibrés étant donné les compositions spécifiques avec lesquelles ils sont formulés. En effet, la quantité de pâte élevée des BAP les rend susceptibles d'être plus déformables (rétractables, dans le cas présent) que les bétons vibrés. Cependant, les données de la littérature dans ce domaine ont tendance à se contredire principalement parce que les formulations comparées sont bien différentes, que ce soit en terme de rapport eau/ciment (E/C), ou de squelette granulaire (volume de pâte).

### **II.11.1. 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 [38] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés (voir figure II.22) d'autres [39] contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton.

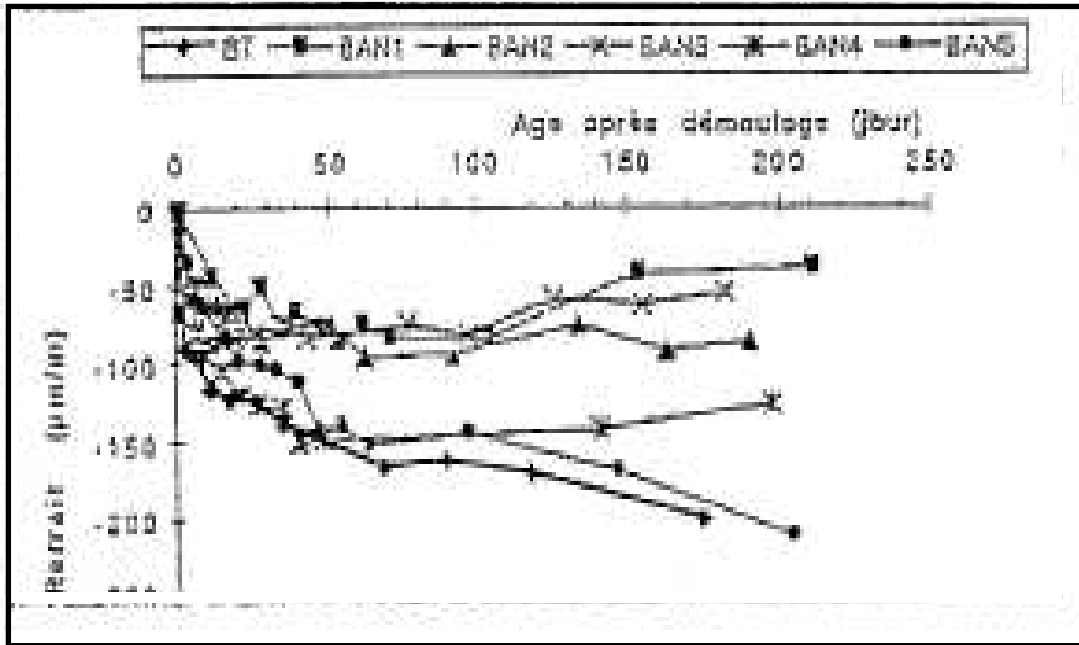


Figure II.22 - Comparaison des retraits endogènes d'un BO et de cinq BAP [38]

### II.11.2 Retrait de séchage

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires.

Certains auteurs [38] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés (voir figure II.23). Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé.

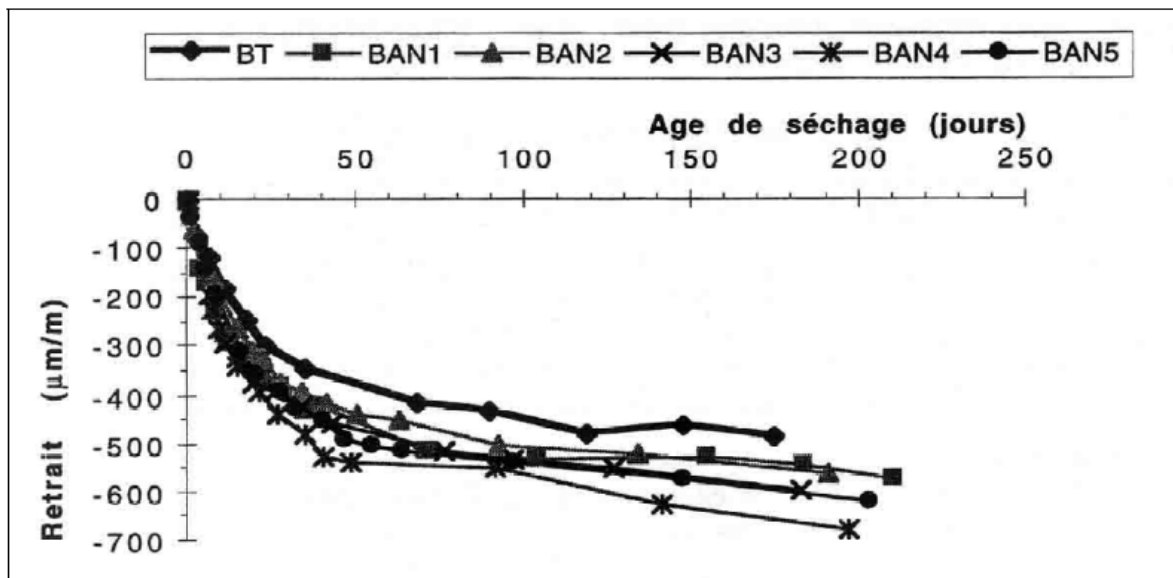


Figure II.23 - Comparaison des retraits de séchage d'un BO et de cinq BAP [38]

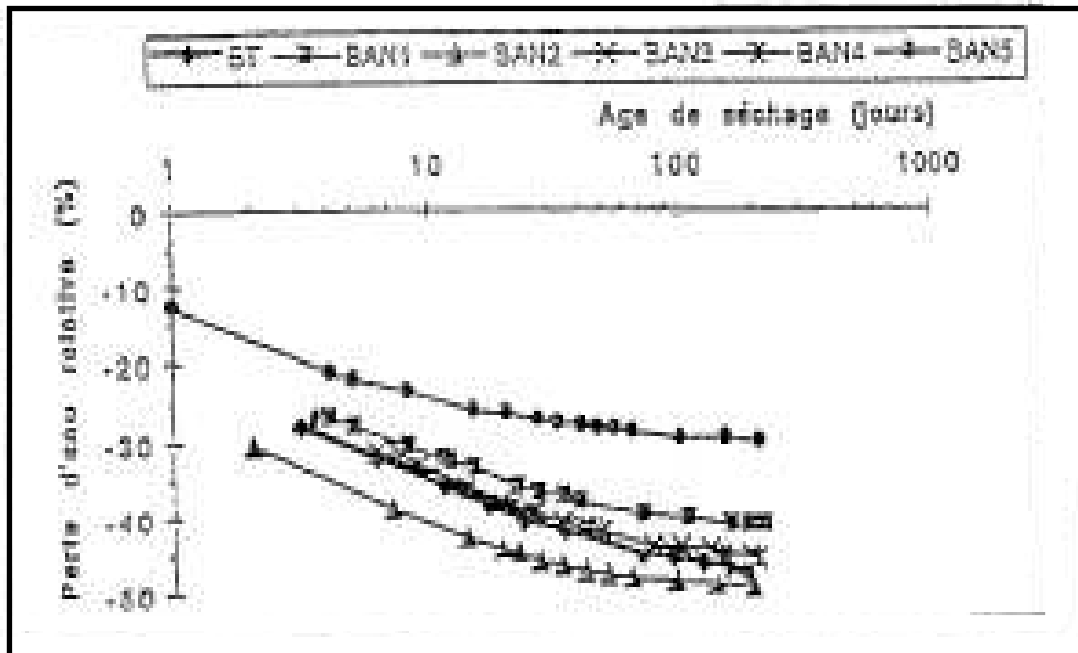


Figure II.24 - Comparaison des pertes d'eau d'un BO et de cinq BAP [38]

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [40]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700  $\mu\text{m}/\text{m}$  (à 180 jours).

Le phénomène est attribué à l'effet du volume de pâte et au rapport E/L car, d'après [37], augmenter le volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage.

## II.12. FLUAGE

Le fluage étant directement lié à la déformabilité de la matrice cimentaire, on peut s'attendre à ce que le volume de pâte des BAP, généralement supérieurs à ceux des bétons ordinaires, conduisent à des déformations de fluage importantes. En première approximation, on peut supposer que l'effet (à résistance égale) sera équivalent à celui obtenu sur le module instantané.

Ce dernier étant communément admis comme indicateur du fluage (BPEL).

Selon Persson [25]. Le fluage des BAP augmente significativement lorsque les charges sont appliquées aux jeunes âges, et diminue lorsqu'il s'agit de BAP à hautes performances.

## II.13. RESISTANCE DES BAP A LA MIGRATION D'ELEMENTS EXTERIEURS

### II.13.1. Migration des chlorures

Selon Tang et al. [25], le béton autoplaçant est moins résistant à la migration des ions chlorure, ils ont trouvé que les coefficients de diffusion d'un BAP de E/C = 0.4 sont deux à trois fois supérieurs ( $31.4$  à  $56.1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) à ceux d'un béton ordinaire de E/C= 0.5 ( $15.1$  à  $18.4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

En réalité les BAP est plus résistants à la migration des ions chlorure, car ils sont plus compacts, mais dans ce cas, il s'agit un BAP poreux.

### II.13.2. Carbonatation

Iwai et al. [25], ont conclu que la profondeur de carbonatation d'un BAP est plus fortement influencée par le rapport E/C que celle d'un béton ordinaire (E/C = 0.45).

Ils ont trouvé que la profondeur de carbonatation naturelle d'un BAP (dont le dosage en ciment est  $350 \text{ kg/m}^3$  ; laitier  $90 \text{ kg/m}^3$  ; superplastifiant 1.1% par rapport au poids du liant un rapport G/S = 1.06 ; et E/L = 0.39) est d'environ 3 mm à 28 jours et de 5 mm à 50 jours.

Maki [25] a effectué des essais de carbonatation accélérée à une température de  $40^\circ\text{C}$ , une humidité de 40%, et une concentration en dioxyde de carbone de 10%. Ces essais ont montré que la profondeur de carbonatation d'un BAP (E/L=0.53) est plus faible que celle d'un béton ordinaire de 8 cm d'affaissement (cf. tableau II.8).

**Tableau II.8 : Essais de carbonatation accélérée sur un BAP et un béton ordinaire [25]**

		BO	BAP
Profondeur de carbonatation (mm)	4 semaines	14	9
	13 semaines	19	13
	36 semaines	22	16

## II.14. MODULE INSTANTANE DES BAP

Les reglements BAEL et BPEL préconisent d'utiliser pour les structures en béton armé ou précontraint dont la résistance à la compression  $f_{c28}$  est comprise entre 40 et 80 MPa, une proportion volumique en granulats au moins égale à 66%. Plusieurs bétons autoplaçants par leur composition, ne sont pas couverts par ces règlements.

Le module instantané des bétons autoplaçants va être en moyenne plus faible que celui des bétons ordinaires du fait d'un volume de matrice plus élevé. Le module de

la matrice cimentaire est compris entre 6 000 et 25 000 MPa, alors que celui des granulats se situe entre 60 000 et 100 000 MPa.

Des calculs ont été réalisés par le LCPC à partir d'un modèle d'homogénéisation développé par Le Roy en 1992 et Le Roy et De Larrard en 1996, afin de prendre en compte les proportions pâte / granulats dans la détermination du module instantané des BAP.

Ces résultats ont été comparés aux prévisions du BAEL basées sur la résistance mécanique :

$$E_{ij} = k \times \sqrt[3]{f_{cj}} \dots\dots\dots (II.6)$$

avec  $k = 11\,000$  pour les bétons ordinaires.

Pons et al. [25] ont réalisé des mesures de module instantané sur quatre bétons autoplaçants. Les résultats confirment la tendance prévue par le modèle d'homogénéisation du LCPC. Les modules instantanés des BAP sont plus faibles, et le coefficient  $k$  de la relation II.6 varie de 7 850 à 9 700 pour les quatre bétons autoplaçants.

## II.15. FABRICATION DES BAP

Les formules de BAP sont en général plus « pointues » que celles des bétons ordinaires.

Les précautions et contrôles particuliers à mettre en place portent sur la maîtrise des constituants, le niveau d'équipement de la centrale, et les procédures de la fabrication des BAP doit intégrer les dispositions visant à maîtriser la teneur en eau du béton, la séquence de malaxage (ordre d'introduction, temps de malaxage), la fourchette d'étalement acceptable les variations de dosage en eau correspondantes, ainsi que les contrôles sur béton frais.

Il est nécessaire d'appréhender au stade de l'étude de formulation la sensibilité des BAP aux écarts de composition et principalement aux variations de teneur en eau. La plage d'étalement du dosage en eau acceptable peut être obtenue en mesurant la résistance à la ségrégation du béton, les valeurs d'étalement, les taux de remplissage, et les densités en fonction du dosage en eau.

La formule possédant le plus fort dosage en eau doit présenter une stabilité satisfaisante. Celle contenant le dosage en eau le plus faible doit conduire à un temps de remplissage correct sans induire de ségrégation de la densité par manque

de compactage gravitaire. Les écarts admissibles sont en général de l'ordre de (+5) l/m<sup>3</sup> [41].

Le malaxage d'un béton autoplaçant ne nécessite pas de matériel particulier ; il s'agit juste d'un malaxeur étanche dont le temps de malaxage est généralement plus long de 50 à 100% que celui d'un béton ordinaire car on doit assurer une homogénéité du squelette granulaire d'une part, et une bonne dispersion du liant et ajouts chimiques dont les proportions sont très faibles d'autre part.

Le temps de malaxage et l'ordre d'introduction des adjuvants sont importants. Dans le cas où l'agent de viscosité à base de polymères anioniques est introduit indépendamment du superplastifiant, il est préférable qu'il le soit après ce dernier, il peut en effet s'adsorber sur les particules de ciment et avoir moins d'interaction avec l'eau.

## **II.16. PRECAUTIONS POUR LA MISE EN ŒUVRE DES BAP**

La principale différence, entre un BAP et un béton traditionnel, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en oeuvre. La spécificité d'un BAP est d'être extrêmement fluide. Il se compacte sous l'effet de son propre poids et ne nécessite donc pas de vibration pour être mis en place. Par ailleurs, le matériau doit être stable pour assurer l'homogénéité de la structure finale.

En terme de mise en oeuvre, les BAP offrent des conditions plus souples que le béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Un des avantages majeurs des BAP, que nous aborderons également dans la partie traitant de leur impact économique, est la réduction de la durée de la phase de coulage : la vidange de la benne se fait plus rapidement, l'écoulement du matériau est bien évidemment plus aisé, la phase de vibration est supprimée et l'arase supérieure est plus facile à réaliser.

### **II.16.1. Mise en place des BAP**

La méthode traditionnelle de remplissage par le haut du coffrage peut être utilisée avec une hauteur de chute plus importante. Il convient cependant de la limiter à 5 m, pour éviter des problèmes de ségrégation dus à la chute du béton dans le coffrage [41]. L'utilisation d'un tube plongeur peut être une alternative pour limiter la hauteur de chute du matériau.

La fluidité des BAP permet par ailleurs l'injection du matériau en pied de coffrage, même pour des éléments verticaux.

L'inconvénient de la mise en place du BAP par le biais d'une goulotte réside dans le fait que cette méthode favorise les phénomènes de ségrégation. Selon le groupe AFGC (Association Française de Génie Civil) « bétons autoplaçants », il convient de limiter la hauteur de chute des BAP à une valeur maximale de 5 m [42].

Toujours d'après les recommandations de l'AFGC [42], quelque soit le mode de remplissage retenu, il convient de limiter la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages. Une perte d'homogénéité peut en effet se manifester lorsque ce cheminement est trop important. Ainsi, la longueur de cheminement maximale préconisée est de 10 m. (Dans certains cas, elle peut être limitée à 5 m (cf. tableau II.9).

**Tableau II.9 : Classification des BAP selon leur application [42]**

Intervalle d'écoulement en ( mm)	Application verticale	Application horizontale	
		Epaisseur ≤ 300 mm	Epaisseur > 300 mm
$I \geq 100$	2	1	2
$80 \leq I < 100$	3	2	2
$I \leq 80$	3	3	3

### II.16.2. Coffrages des structures en BAP

Les précautions permettant d'assurer une bonne étanchéité des moules qui sont les mêmes que celles pratiquées actuellement pour les bétons fluides ordinaires. La pâte des BAP est très cohésive et limite les pertes de laitance.

L'intensité de la poussée des BAP sur les parois est un sujet qui fait encore l'objet de controverses. Le groupe AFGC [42] préconise de considérer une pression au pied du moule correspondant à la poussée hydrostatique du béton frais. Billberg [43], déclare que lorsque les BAP ont été développés, il était généralement admis qu'ils génèreraient une pression hydrostatique.

Or différentes études ont montré que la pression exercée par les BAP sur les coffrages était plus faible que celle attendue, et dépendait de la vitesse de remplissage du coffrage [43].

Ceci proviendrait du caractère thixotrope du matériau, c'est à dire de sa capacité de structuration au repos [44]. La pression exercée par le BAP sur le coffrage dépendrait non seulement de la vitesse à laquelle il est mis en place mais également

du mode de remplissage choisi. Lorsque le remplissage est effectué rapidement ou lorsqu'il est effectué en pied de coffrage, la pression latérale exercée sur le coffrage serait de l'ordre de la pression hydrostatique car le matériau n'a pas le temps de se structurer. En revanche, un remplissage plus lent et effectué par le haut du coffrage permet au matériau de se structurer [44].

Concernant la préparation des coffrages, notamment vis à vis de l'étanchéité et de l'absence de débris, les précautions à prendre sont similaires à celles pratiquées pour les bétons traditionnels [42]. Les recommandations de la FFB [45] précisent cependant que l'étanchéité en pied de coffrage est essentielle et que la propreté des coffrages est à vérifier tout particulièrement. En effet, l'aspect de surface des BAP étant un de leurs principaux atouts, il convient d'apporter un soin particulier à la préparation des coffrages. Ce temps de préparation supplémentaire n'est cependant pas pénalisant pour l'avancement du chantier et reste négligeable face au gain de temps apporté par la suppression de la phase de vibration.

L'absence de vibration simplifie par ailleurs le calage des armatures et des réservations. Comme pour les bétons traditionnels, il convient de vérifier les conditions atmosphériques avant coulage. En dehors de la gamme 5 - 25°C, des dispositions particulières sont à prendre [45 - 46].

### **II.16.3. La cure des BAP**

Une attention particulière doit être portée à la protection de la mise en œuvre pour éviter l'évaporation, particulièrement dans le cas d'applications horizontales.

Le faible ressuage des BAP les rend en effet plus sensibles au retrait plastique [42]. D'une manière générale, il est recommandé d'éviter une évaporation trop importante dans les premières heures après mise en œuvre [42].

D'après les recommandations de la FFB [45], comme pour tous les bétons ayant reçu un produit de cure, le ponçage ou le grenailage est obligatoire avant la pose de tout revêtement solidaire au support. Cette préparation doit être réalisée le plus tard possible dans le cas des bétons autonivellants (applications horizontales), au minimum après 28 jours.

La mise en œuvre d'un BAP est plus simple que celle d'un béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Certaines précautions supplémentaires sont à prendre, lors de la préparation des coffrages par exemple (propreté, étanchéité...),

mais globalement les consignes restent similaires à celles définies pour les bétons traditionnels.

### II.17. DOMAINE D'APPLICATION DES BAP

Grâce à sa fluidité, le BAP peut être utilisé dans plusieurs applications :

- ✓ Coulage dans des zones fortement ferraillées,
- ✓ Coulage dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles,
- ✓ Coulage pour obtention de très bonnes qualités de parement.

L'un des avantages majeurs du BAP est de permettre la réalisation de parements de grande qualité. Leur composition, riche en éléments fins, permet d'obtenir une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrante utilisée. Les aspects satinés, lisses ou très structurés recherchés par les architectes sont alors plus facilement réalisables.

Des teintes homogènes et régulières peuvent être obtenues si les conditions de mise en oeuvre évoquées précédemment sont respectées, notamment du point de vue de la propreté des coffrages.

Le coulage d'un béton dans une zone très fortement ferraillée menait traditionnellement à un surdimensionnement de la pièce afin de rendre accessible tout point du bétonnage.

L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de forme complexe.

Les BAP constituent donc une alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction : bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation, etc.

Walraven [47] précise cependant que les BAP sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent. Globalement, leur utilisation permet de réduire les coûts de production et, parallèlement, d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis. Leur utilisation est plus délicate sur site car les BAP sont particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau. Or, bien que la production soit contrôlée, les lots de matériaux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes.

En effet, la formulation des BAP est particulière : utilisation d'adjuvants et d'additions minérales. Leur sensibilité en ce qui concerne le dosage et la teneur en eau, la qualité et la régularité des composants ainsi que les conditions de malaxage, nécessite donc la mise en place d'un suivi plus important.

Par ailleurs, la réglementation n'est pas encore adaptée au cas des BAP. En effet, la norme NF EN 206 ne définit que cinq classes de consistance (ferme → fluide). Actuellement, tous les BAP sont donc regroupés dans la classe 5 (fluide) [47].

## II.18. IMPACT SOCIO-ECONOMIQUE DE L'UTILISATION DES BAP

La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique :

- ◆ Une diminution du bruit sur site
- ◆ Une diminution de la pénibilité des tâches
- ◆ Une réduction des risques d'accident

En effet, le bruit engendré pendant la phase de vibration est particulièrement désagréable puisqu'il est d'une intensité élevée sur des périodes relativement longues. Dans le cas des usines de préfabrication, où la réverbération du bruit sur les parois peut augmenter le niveau sonore de manière très importante, toutes les personnes présentes dans l'atelier sont concernées par la réduction du niveau sonore ambiant. Cette réduction des nuisances sonores peut éventuellement permettre une meilleure implantation des usines dans leur environnement, puisqu'il est plus facile de respecter les réglementations en matière d'insonorisation.

Dans le cas d'un chantier en extérieur, ce sont principalement les personnes chargées de la mise en place et de la vibration qui bénéficient de la réduction du bruit, mais également les riverains lorsqu'il s'agit d'un site urbain.

Malgré l'utilisation de procédés de construction de plus en plus mécanisés, les efforts physiques auxquels sont soumis les ouvriers restent pénibles. Avec l'apparition des BAP, les opérations traditionnelles de coulage, d'étalement, de talochage et de surfacage se réduisent à une étape de coulage suivie d'un débullage dans le cas des applications horizontales. Pour les opérations verticales, les divers déplacements sur les banches, à travers trappes et échelles, sont réduits de manière significative. De plus, le fait de vibrer le béton peut avoir de graves répercussions sur la santé et peut

notamment provoquer des troubles de la circulation sanguine (maladie des « mains blanches »).

Par ailleurs, les BAP sont mis en place par des opérations simplifiées donc par des agents plus rapidement formés. Ils peuvent donc se concentrer sur la préparation des coffrages sans avoir à assimiler ou mettre en pratique les recommandations sur la vibration. Mais compte tenu des objectifs exigeants des BAP, les techniciens du béton (formulateurs, agents de laboratoires et responsables de chantier) sont plus sollicités sur leurs connaissances des matériaux. Ils doivent donc se familiariser avec ces nouvelles formules de béton, les constituants utilisés, mais aussi avec les matériels et procédures nécessaires à leur préparation [48].

L'utilisation d'un BAP peut s'avérer plus économique que celle d'un béton ordinaire, et ce malgré un surcoût de formulation. Ce surcoût est principalement lié à l'adjuvantation puisque la fluidité doit être instantanée, mais également se maintenir dans le temps, dans le cas où les lieux de fabrication et de coulage ne seraient pas les mêmes.

Cependant, ces frais supplémentaires peuvent rapidement être compensés par la diminution des coûts de main d'oeuvre (réduction du nombre d'intervenants pendant la mise en place du béton), du temps de coulage, des délais de fabrication, etc. Les BAP montrent en effet tout leur potentiel lorsque le chantier est considéré dans son ensemble, frais directs et indirects, donc par « l'approche globale » suggérée par Malier [49].

Même si l'utilisation des BAP nécessite certaines précautions en matière de formulation ou de préparation du matériel, l'évaluation de leurs avantages techniques mais également socioéconomiques montre que ces bétons devraient être de plus en plus utilisés à l'avenir.

## **II.19. CONCLUSION**

Dans le cas du béton autoplaçant on renonce à toute forme de compactage après le coulage du béton frais dans le coffrage. Ceci permet entre autre d'accroître la productivité, d'améliorer la situation sur le chantier, d'augmenter la durabilité et autorise également l'exécution du bétonnage dans des conditions spécifiques.

Les propriétés les plus importantes d'un BAP par rapport au béton ordinaire sont une fluidité très élevée, la résistance à la ségrégation et la capacité à combler intégralement l'espace entre les barres d'armatures.

Tandis que l'aptitude à la déformation et la résistance à la ségrégation dépendent des composants intervenant dans le béton et de la formulation, l'aptitude à envelopper intégralement l'armature dépend de la forme du coffrage, de la teneur et de la densité de l'armature. Pour atteindre cette propriété, il convient de tenir compte de la disposition de l'armature et de contrôler le volume et la taille maximale des grains des granulats.

Ceci est obtenu grâce à une optimisation spécifique, composée pour l'essentiel d'une teneur en liants suffisante, d'une composition des granulats équilibrée avec une teneur en fines accrues et d'un superplastifiant approprié.

Outre la formulation adéquate, il convient d'accorder une attention toute particulière à la fabrication, à la mise en oeuvre du béton frais et à la technique de coffrage.

La fluidité élevée de ce béton est obtenue par l'adjonction d'un superplastifiant. Il convient de tenir compte du fait qu'une fluidité extrême peut provoquer la ségrégation.

Ce phénomène peut être combattu par l'adjonction d'un « adjuvant de contrôle de la viscosité », généralement à base de cellulose méthylique ou par l'adjonction d'une grande quantité de matériaux poudreux comme, les cendres volantes, la farine calcaire, la fumée de silice ou les laitiers de hauts-fourneaux. L'adjonction d'un entraîneur d'air peut également avoir une influence positive sur la ségrégation et stabiliser le béton. L'emploi excessif d'agents épaississants à base de cellulose méthylique ou de poudre peut toutefois entraver la fluidité. Il est de ce fait indispensable de déterminer un équilibre optimal entre la fluidité et la ségrégation dans le cadre d'essais préliminaires.

# **CHAPITRE III**

**Argiles cuites dans le béton - Etat de connaissances**

### III.1. INTRODUCTION

Au fil des années, les chercheurs du secteur de la construction s'emploient à développer des constructions qui s'inscrivent dans un effet de développement durable, pour lesquelles ils utilisent des matériaux recyclés et que la majorité de leurs rebuts peuvent être également récupérés.

Les débris de maçonnerie sont généralement constitués de déchets de béton, de briques silico-calcaires, de briques de terre cuite, de blocs de béton léger et d'autres types de blocs. D'autres déchets peuvent exister, tels que les mortiers de ciment, les enduits et les produits de terre cuite comme les tuiles [50].

En ce qui concerne, les produits de terre cuite, on distingue ceux qui sont produits lors de la production et ceux issus des chantiers de construction et de démolition. Lors du processus de la production, deux types de déchets peuvent être entraînés : les rebuts de produits avant cuisson et les rebuts après cuisson. Les déchets générés dans les différentes étapes précédant le passage dans le four (façonnage, séchage) ne posent aucun problème : ils sont intégralement réintégrés dans le circuit de matières premières et recyclés en totalité. Les déchets de cuisson peuvent être utilisés pour empierre les chemins de voies de circulation des carrières de terre. Ils peuvent être aussi broyés pour faire les revêtements de terrains du sport ou utilisés comme chamotte. Cette chamotte est l'un des dégraissants utilisés dans la préparation de l'argile.

Selon la méthode utilisée pour la fabrication et la manipulation des briques, il existe toujours un certain pourcentage de briques cassées, trop cuites ou mal cuites.

Les briques concassées et bien cuites conviennent bien à la fabrication des blocs de béton. D'autres recherches ont montré la possibilité de fabriquer un béton à base de granulats issus du concassage des briques de terre cuite. Le béton contenant de l'argile possède une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de granulats naturels [51]. Cependant, il existe peu d'informations disponibles sur le devenir des déchets de démolition des produits de terre cuite. Des travaux ont été effectués envisageant un recyclage complet des maçonneries en brique de terre cuite : après démolition des murs, les briques avec mortier sont réduites. Ceci

permet une séparation aisée des mortiers de chaux ou de ciment dégradés par les hautes températures.

Ces mortiers ainsi régénérés sont utilisés de nouveau. La partie terre cuite est ensuite triée en briques entières et en demi-briques et autres petits éléments qui sont concassés pour faire des granulats.

En Algérie, les déchets de chantier ne sont pas clairement identifiés par la classification habituelle qui distingue les déchets ménagers ou assimilés, les déchets industriels et les déchets spéciaux.

Ces dernières décennies, l'activité du bâtiment a connu une évolution très considérable et ce pour faire face à une demande en logements toujours en augmentation. Cette situation induit une augmentation considérable de la demande en brique. La production locale en brique ne cesse d'augmenter avec un taux de croissance annuel de l'ordre de 5%. Elle a été estimée à 16 millions de tonnes en 2012.

Les processus de fabrication de la brique de terre cuite sont mal contrôlés, ainsi la température de cuisson des briques de terre cuite n'est plus homogène du fait, de vieillissement de certains fours existants dans nos briqueteries. Cette situation entraîne donc des pertes importantes en matière qui varient, selon les usines, de 5 à 10% de la production totale de ces éléments [52], (soit 800 000 à 1 600 000 Tonnes par an). Ce taux de rebut de la production de brique dépend aussi de la qualité d'argile (sa richesse en silice et en alumines) et la maîtrise de processus de fabrication. Ces déchets font l'objet de recyclage par les briqueteries. Il est utilisé comme dégraissant à la place du sable siliceux (généralement sable de dunes) pour minimiser le taux d'absorption et favoriser une meilleure qualité du produit fini.

### **III.2. DECHETS DE BRIQUE DANS LES BETONS**

Les effets des fillers sur leur comportement à l'état frais et à l'état durci sont de grande importance pour un plus large usage de ces matériaux. Diverses études suggèrent que l'addition des fillers, pouzzolaniques ou non pouzzolaniques, au ciment de Portland affecte les propriétés du béton frais et durci.

En général, le critère de fluidité - stabilité est assez difficile à rencontrer, mais, au moyen des adjuvants, des teneurs élevées en ajouts minéraux ou des teneurs appropriées en sable et en gros granulats, la stabilité et la déformabilité sont assurées.

Les bétons autoplaçants comportent une importante quantité de fines, (environ 700 kg/m<sup>3</sup> de diamètre inférieur à 80 µm) pour assurer la maniabilité et limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Le liant utilisé est fréquemment un mélange de deux ou trois constituants, afin d'éviter l'élévation de température du béton lors de la prise du béton.

Très souvent, l'ajout d'une quantité de filler à un béton, permet de diminuer le ressuage et la ségrégation dans ce béton.

Les fines siliceuses lorsqu'elles sont introduites dans le BAP, conduisent à des propriétés semblables à celles obtenues pour les bétons à hautes performances à savoir une augmentation de la compacité et donc des résistances mécaniques plus élevées [12].

A. Boucetta et Behim [27], ont substitué totalement les fillers calcaires d'un BAP par des tessons céramiques récupérés sur des gravats de maçonnerie de brique rouge avec des dosages allant de 30 à 60 %. Ils ont trouvé que le dosage optimal en filler de brique dans un BAP est de 30% à l'état frais et 45% à l'état durci.

Ils estiment qu'il est possible d'atteindre un niveau de viscosité convenable pour un BAP permettant de diminuer le risque de ségrégation en utilisant les fines d'argile cuite à une teneur de 30%, et que leurs caractéristiques physiques et pouzzolaniques peuvent développer des effets aussi bien sur le béton frais, par l'amélioration de la fluidité et la stabilité, que sur le béton durci par l'augmentation des résistances mécaniques [27].

Une nette amélioration des performances mécaniques d'un béton de sable est aussi constatée grâce à l'addition des fillers de brique (effet granulaire) [53].

Il se trouve que, très souvent, les briques fabriquées dans des fours de 800°C contiennent une teneur assez élevée d'argile kaolinitique. Chinje melo et coll [54], ont travaillé sur trois échantillons de briques et tuiles cuites produites en Cameroun, Ils ont constaté, que la substitution d'une partie d'un ciment de type CPA-CEM I 42.5

dans des mortiers par ces déchets broyés jusqu'à un diamètre inférieur à 100  $\mu\text{m}$ , donne des indices d'activité pozzolanique qui varient entre 77% et 96% et de 67% à 84% respectivement pour 10% et 20% de substitution.

L'ajout de 5% du déchet de brique broyé dans la composition d'un béton autoplaçant a permis non seulement d'améliorer les résistances mécaniques (compression et traction), mais aussi de favoriser un meilleur comportement rhéologique en matière de fluidité et de stabilité par rapport à un BAP témoin [55].

### III.3. METAKAOLIN

Le Métakaolin (MK), issu d'une activation thermique du kaolin, est une pouzzolane de synthèse utilisée comme addition minérale dans les bétons et les liants hydrauliques. Sa première utilisation, antérieure à 1962, concerne le béton de barrage de Jupia Dam au Brésil [56].

L'utilisation des ajouts dans le ciment pour la fabrication des mortiers et bétons offrent des avantages économiques et écologiques indéniables. Peu d'études se sont intéressées aux propriétés mécaniques et de durabilité des mortiers et bétons à base de ciment au métakaolin.

Les bétons contenant du métakaolin présentent des comportements similaires à ceux contenant de la fumée de silice, c'est-à-dire une amélioration de la résistance mécanique et une réduction significative de la perméabilité.

Certains auteurs ont constaté qu'une addition de l'ordre de 15% de métakaolin confère une capacité supérieure de résistance en milieux agressifs, tels ceux des eaux de mer et des solutions acides [57].

M. Si-Ahmed [58] a réalisé une étude sur la performance des mortiers et bétons à base de métakaolin issue de la calcination du Kaolin de Mila à une température de 850 °C pendant une durée de 3 heures. Les résultats observés ont montré que les taux de substitution de 10 et 15% du ciment par du métakaolin augmente la résistance à la compression et à la traction au jeune âge et à long terme et que la durabilité a été également améliorée par une diminution du coefficient d'absorption d'eau par capillarité de 25 et 30% respectivement.

L'utilisation du métakaolin dans les bétons comme substitut du ciment offre des avantages divers dont les principaux se rapportent au fait que le ciment est le composant le plus coûteux du béton, que sa production exige une grande consommation d'énergie et que la production d'une tonne de ciment génère approximativement autant de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Les autres avantages comprennent la réduction des résidus industriels (dans des sites d'enfouissement) et l'exigence en ressources naturelles (par exemple, moins de calcaire pour fabriquer le ciment). Le choix judicieux des ajouts cimentaires permet d'améliorer les propriétés et la durabilité des bétons auxquels ils sont incorporés.

### III.3.1. La calcination du kaolin

Le kaolin est une argile blanche, tendre, pure, de plasticité variable mais généralement faible, qui conserve sa couleur blanchâtre après la cuisson. Cette roche, extraite en Chine d'une colline du nom de Kaoling «colline élevée», (d'où l'origine du terme kaolin) a été expédiée en Europe pour la première fois au début du XVIIIe siècle. Le kaolin pur est la matière première de la porcelaine fine. Les variétés impures sont employées dans la fabrication de la poterie, du grès et des briques; comme ingrédient dans la fabrication des pigments et servent de charge pour le papier.

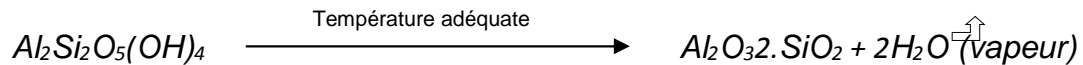
Le principal composant du kaolin est la kaolinite, phyllosilicate hydraté, ensemble moléculaire théorique " $2\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ", provenant de l'altération par l'humidité - *kaolinisation* - des roches à feldspaths et des granits (qui contiennent des feldspaths et du quartz).

Ces roches se sont lentement chargées et saturées d'eau à l'échelle moléculaire sous l'effet de l'humidité avant de subir l'érosion. Les  $2\text{H}_2\text{O}$  concernés (eau de constitution) ne s'évaporent de l'argile qu'à partir de  $350^\circ\text{C}$ .

Le préfixe méta est employé pour dénoter le changement, c'est un emprunt de la signification grecque après. Dans le cas du métakaolin, le changement qui intervient est la déshydroxylation, par calcination du kaolin (silicate d'alumine hydraté  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ , aux températures comprises entre  $750$  et  $800^\circ\text{C}$  pendant 6 heures [52] pour retirer ses molécules d'eau et obtenir le métakaolin, amorphe et très réactif.

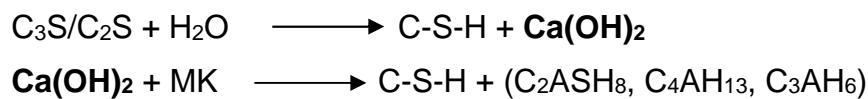
La calcination induit une phase de modification du kaolin, passant de kaolinite naturelle au métakaolin. La dernière phase de modification fait apparaître des composants amorphes riches en silice.

La réaction globale de déshydroxylation peut se schématiser ainsi :



De ce fait, le métakaolin est considéré comme une pouzzolane réactive. La chaux libérée au cours de l'hydratation des composés du clinker réagit avec le matériau pouzzolanique à l'intérieur du mélange pour former des produits qui participent aux résistances mécaniques du mortier ou du béton.

La réaction pouzzolanique du métakaolin (MK) est comme suit :



Cette pouzzolane très réactive est broyée pour obtenir des particules de 1µm à 2µm de diamètre moyen.

### III.3.2. Analyse chimique du Métakaolin

Dans le tableau III.1, on donne quelques valeurs de la composition chimique du MK issue de la calcination d'un kaolin Algérien et celles de la fumée de silice et les cendres volantes pour la comparaison.

Tableau III.1 : composition chimique [59]

Composition chimique (%)	Matières cimentaires		
	Métakaolin	Fumée de silice	Cendres volantes
SiO <sub>2</sub>	52 - 54	85 - 96	56 - 80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42 - 44	0.25	28 - 20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 - 1.40	0.79	5 - 30
CaO	< 0.10	/	< 3.0
MgO	< 0.10	/	5.20
Na <sub>2</sub> O	< 0.05	0.17	/
K <sub>2</sub> O	< 0.40	0.96	/
TiO <sub>2</sub>	< 3.00	/	/
SO <sub>3</sub>	< 0.10	0.30 - 0.70	0.68
PAF	< 1.00	3.50	

### III.3.3. Caractérisation du Kaolin (gisement Tamazert - El Milia - Algérie)

Le gisement de Tamazert est situé à 5 km de la ville d'El Milia dans la wilaya de Jijel, et se compose d'une usine de traitement et d'une carrière située à Tamazert (17 km de l'usine).

L'exploitation du gisement remonte aux années 1920, on y extrayait du kaolin brut, trié et séché, sa qualité moyenne permettait exclusivement son utilisation pour la céramique vaisselle, céramique sanitaire, carreaux, papeterie (comme charge), et les industries de peinture, de plastique, des pesticides, et du caoutchouc.

Il s'agit d'un gisement dont l'hétérogénéité impose une extraction simultanée en plusieurs endroits pour obtenir des produits finis de qualité constante. Cependant, des connaissances de la structure du gisement (étendue, limites, perturbation) en font quand même un gisement de qualité satisfaisante.

Tableau III.2 : Analyse chimique d'un Kaolin Algérien [59]

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	PAF à 1000°C
Composition chimique (%)	49,30	33,50	01,59	0,40	0,15	0,08	0,09	2,75	10,50

**Tableau III.3 : Analyse minéralogique d'un Kaolin Algérien [59]**

<b>Composition minéralogique (%)</b>	
Kaolinite	74
Matières micacées	08
Argile	10
Quartz	08

Les résultats de l'analyse chimique du Kaolin montre une forte présence de la silice à plus de 49% et des alumines à une teneur de 33%.

# **CHAPITRE IV**

# **ESSAIS ET MATERIAUX UTULISES**

### IV.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons les différentes techniques et essais réalisés, ainsi que les expressions de calcul adoptées. Ces essais ont été effectués au niveau des laboratoires :

- ✓ Bâties dans l'environnement (FGC-USTHB) ;
- ✓ Laboratoire de conception et contrôle qualité de l'entreprise GRANITEX (fabrication des adjuvants) ;
- ✓ Laboratoires de développement et contrôle qualité de deux cimenteries Lafarge Algérie;
- ✓ Laboratoire de CETIM - Boumerdes ;
- ✓ Laboratoire du CNERIB.

Le protocole expérimental est devisé en deux grandes parties : essais d'analyses chimiques et minéralogiques sur des pâtes liantes, argile et poudre de brique et essais sur bétons et ses constituants (caractérisation rhéologique et mécanique).

La nature physico-chimique et minéralogique des ajouts influent sur les propriétés des différents mélanges hydrauliques (coulis, mortier et béton). Pour cela, il est nécessaire d'identifier et caractériser les différents matériaux utilisés afin de mieux interpréter les résultats du programme expérimental.

Dans l'objectif d'évaluer l'effet pouzzolanique du déchet de brique broyé (DBB) sur les performances mécaniques d'un mélange hydraulique, des essais de caractérisation mécanique sont effectués sur mortier avec des différents dosage en DBB (0, 5% , 10% et 15%).

Des essais de chaleur d'hydratation par le calorimètre de Langavant ont été réalisés sur un mélange de clinker et 10% de DBB. Les résultats de ces essais sont comparés à ceux obtenus sur des mélanges de clinker et 10% de calcaire (fréquemment utilisé comme ajout dans l'industrie cimentaire locale), et un autre mélange de clinker et 10% de laitier du haut fourneau d'El-Hadjar (considéré comme l'ajout cimentaire de référence en matière de limitation de la chaleur d'hydratation).

Une évaluation de l'influence de l'ajout de DBB sur le comportement rhéologique d'un coulis de ciment permet d'identifier le point de saturation du SP. L'étude consiste à mesurer l'évolution du temps d'écoulement au cône de Marsh d'un coulis

de ciment au DBB en fonction de la variation de sa teneur en SP. Les résultats de ces essais font l'objet d'une comparaison à ceux d'un coulis de ciment sans ajout (témoin).

L'étude d'optimisation du squelette granulaire du BAP consiste à identifier la teneur et la combinaison des gros granulats ainsi que le rapport volumique sable/pâte optimal qui donne les meilleures déformabilités pour une teneur fixe en SP.

Trois proportions granulaires sont considérées. Il s'agit d'une combinaison massique (1) de 2/3 de granulats de la fraction G3/8 et 1/3 de G8/15, une autre (2) qui présente une combinaison massique de 1/2 de G3/8 et 1/2 de G8/15 et enfin une combinaison massique (3) de 1/3 de G3/8 et 2/3 de G8/15

Ensuite, la combinaison massique qui favorise les meilleures performances rhéologiques et mécaniques est utilisée pour étudier l'effet de la variation du rapport E/L (0.4, 0.36, 0.32) sur les caractéristiques des BAP à l'état frais et à l'état durci.

La combinaison optimale (squelette granulaire et rapport E/L) est utilisée aussi pour étudier l'effet de la variation de la teneur en ajout chimique sur les caractéristiques des BAP à l'état frais :

- Effet de la variation de la teneur en SP sur la fluidité du BAP (de 1% à 3% de SP par rapport au poids du ciment).
- Effet de la variation de la teneur en agent de viscosité sur la fluidité et la stabilité du BAP (de  $0,01 \times 10^{-2}\%$  à  $0,05 \times 10^{-2}\%$  par rapport au poids d'eau).

A la base des différents essais d'optimisation, trois formulations de BAP sont sélectionnées (BAP avec 5% de DBB, BAP avec 5% de FS et BAP témoin) pour des essais de caractérisation rhéologiques (étalement, stabilité et viscosité dynamique), des essais de résistances mécaniques (compression et traction par fendage), des mesures d'auscultation dynamique, porosité totale, absorption capillaire et étude de retrait (endogène, de séchage et total).

Le présent chapitre résume les caractéristiques chimiques et minéralogiques des différents matériaux (cru d'argile, ciment, DBB, FS, laitier) ainsi que les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés.

## IV.2. TECHNIQUES ET ESSAIS

### IV.2.1. ANALYSE CHIMIQUE, MINÉRALOGIQUE ET THERMIQUE

#### IV. 2.1.1. Analyse chimique

Cette analyse consiste à identifier la composition chimique des différents matériaux utilisés dans le cadre de cette recherche (ciment, cru d'argile, déchet de briques broyées, fumée de silice et laitier) grâce aux essais expérimentaux normalisés cités ci-dessous :

- Perte au Feu (NA 5042);
- Teneur en Chlorures (NA 5042);
- Dosage du Résidu Insoluble ;
- Teneur en sulfates  $SO_3$  (NA 5042);
- Analyse des éléments majeurs et mineurs par Fluorescence X ;
- Mesure de la Chaux Libre.

#### IV.2.1.2. Analyse minéralogique avec la diffraction aux rayons X (DRX)

L'analyse par diffraction aux rayons X est une technique permettant de déterminer les différentes phases minéralogiques constituant le matériau analysé ainsi que son organisation atomique (structure minéralogique). ;

Le principe général de la méthode consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X, et à déterminer l'intensité de rayons X qui est diffusée selon l'orientation dans l'espace.

#### IV.2.1.3. Essais d'identification des propriétés à la cuisson

L'étude à la cuisson consiste à étudier la variation physique de cru d'argile, destiné à la fabrication de la brique, traité à des différentes températures (850°C, 900°C et 950°C). Ces essais permettent d'identifier la perte au feu, le taux d'absorption, la perte de volume, le retrait total et la résistance mécanique.

## IV.2.2. MESURE DE LA CHALEUR D'HYDRATATION

Les réactions du ciment Portland en présence d'eau ou "hydratation" produisent des composés hydratés qui permettent de lier les différentes particules de ciment et de granulats ce qui confère au béton ces qualités de résistance mécanique. Ces réactions s'accompagnent d'effets secondaires qui peuvent produire des dégradations du matériau lorsqu'ils ne sont pas pris en compte.

L'un de ces effets est la chaleur dégagée lors de ces réactions d'hydratation dont la grandeur dépend de la composition du ciment.

La dynamique des réactions d'hydratation va dépendre de nombreux facteurs tels que finesse de mouture, composition, ajout d'éléments secondaires (gypse par exemple).

Ces propriétés liées aux réactions d'hydratation doivent permettre de pouvoir travailler le produit béton jusqu'à sa mise en forme. Elles doivent aussi permettre au produit de durcir dans un temps suffisamment court pour pouvoir poursuivre les travaux de construction.

Conformément à la norme NF-EN 196-9, le principe de cet essai consiste à mesurer en continu la chaleur d'hydratation du ciment dégagée au cours des premiers jours. Cette chaleur est exprimée en joules par gramme de ciment.

Le flux (ou cinétique) de dégagement de chaleur est un des phénomènes les plus importants qui accompagne la prise et le durcissement des ciments. Sa détermination (exprimé en Joules/gramme.Heure) permet d'obtenir des renseignements sur le processus d'hydratation du ciment.

La méthode de bouteille isolante a été mise au point par Cleret De Langavant (dite méthode de calorimétrie semi- adiabatique). Cette méthode consiste à suivre l'évolution de la température d'un mortier 1/3 placé dans une bouteille isolante à large ouverture. Le mortier est mis dans une boîte métallique au centre de laquelle se trouve soit un thermomètre au 1/10 °C, soit un couple thermoélectrique reliée à un enregistreur. Les quantités de chaleur dégagées sont obtenues à partir de la courbe d'échauffement. En effet, il faut tenir compte de la déperdition propre à chaque bouteille et de la température ambiante. La correction se fait à l'aide d'une deuxième bouteille témoin dont le mortier n'évolue plus.



**Figure – IV. 1 Bouteille de Cleret De Langavant**

Cet essai fournit des valeurs fiables durant les trois premiers jours d'hydratation des mortiers. Au-delà de trois jours, l'erreur due aux pertes thermiques de l'appareil devient très importante. Les valeurs à 72 h dépendent à la fois de la chaleur totale et de la cinétique de la réaction, qui dépendent elles-mêmes de la composition chimique (car les différentes réactions d'hydratation n'ont pas la même énergie d'activation) et de la finesse du clinker.

#### **IV.2.3. OPTIMISATION DE LA PATE LIANTE (METHODE DES COULIS)**

Étant donné que les essais sur béton sont particulièrement exigeants en termes de matériaux, d'énergie, de temps et d'espace, des chercheurs ont développé des essais sur coulis plus simples et plus rapides à mettre en œuvre. Les deux essais les plus utilisés sont l'essai du mini cône et l'essai d'écoulement au cône de Marsh. Ces deux tests permettent d'évaluer la compatibilité ciment-SP et de mettre en évidence l'existence d'un dosage critique en superplastifiant au-delà duquel toute addition de l'adjuvant n'améliore plus la rhéologie du coulis. Ce dosage particulier est appelé dosage au point de saturation. Passé ce taux, on voit très rapidement se développer de la ségrégation, du ressuage et un retard de durcissement.

La confection des coulis consiste à utiliser un malaxeur de capacité de 5 litres à axe vertical et à trois vitesses, le principe de la confection consiste à :

1. Mettre dans le bol la quantité d'eau nécessaire pour effectuer l'essai, additionnée de la moitié du superplastifiant ;
2. Déverser graduellement la quantité de ciment (éventuellement avec un ajout minéral) ;

3. malaxer ensuite le mélange pendant 2 minutes, avec une grande vitesse ;
4. ajouter la moitié de la dose restante du superplastifiant, et malaxer pendant 1 minute a grande vitesse.

Juste après l'arrêt du malaxage, déverser la totalité du coulis dans le cône de Marsh tout en fermant son ouverture inférieure, ensuite lancer l'écoulement du coulis dans l'éprouvette graduée et mettre le chronomètre en marche. Lorsque le volume du coulis atteint 1 litre dans l'éprouvette on note le temps correspondant.

#### IV.2.4. ESSAIS SUR MORTIERS: MESURES DES RESISTANCES MECANIQUES

Il s'agit de définir les résistances à la compression et à la flexion des mortiers de ciment dans l'objectif d'apprécier l'impact de variation de la teneur de l'un des composants sur les performances mécaniques du mortier.

Pour réaliser ces essais, des exigences normatives liées aux équipements de mesures ainsi qu'aux conditions réglementaires devront être respectées (NA 234/EN 196-1) :

- ✚ Une salle maintenue à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et à une humidité relative supérieure ou égale à 50%.
- ✚ Une chambre ou une armoire humide maintenue à une température de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  et à une humidité relative supérieure à 90%.
- ✚ Un malaxeur normalisé.
- ✚ Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvette prismatique de section carré ( $4 \times 4$ )  $\text{cm}^2$  et de longueur de 16 cm.
- ✚ Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de  $15 \pm 0,3$  mm à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.
- ✚ Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10 KN avec une vitesse de mise en charge de  $50 \pm 10$  N/s. La machine doit être munie d'un dispositif de flexion.
- ✚ Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN (ou plus si les essais l'exigent)



**Figure IV.2 - Machine d'essai de compression et de flexion des mortiers (EN 196-1)**

## IV.2.5. ESSAIS SUR GRANULATS

### IV.2.5.1. Essai d'équivalent de sable (NA 455 / EN 933 - 8)

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution floculante ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment ( $H_1$ ) et du sédiment + floculant ( $H_2$ ). L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$ES = \frac{H_1}{H_2} \times 100 \dots\dots\dots (IV.1)$$

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible.

### IV.2.5.2. Module de finesse (EN 12 - 620)

Le module de finesse d'un sable est défini par le 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5.

### IV.2.5.3 Masses volumiques (NA 255)

Il s'agit de mesurer le volume absolu, en vrac, et apparent du sable et de chaque fraction granulaire pour déterminer le squelette granulaire du béton.

### IV.2.5.4. Essai Los Angeles (NA 458)

Cet essai consiste à mesurer la résistance des granulats à la fragmentation par chocs. Il se pratique sur les classes granulaires 4/6.3 ou 6.3/10 ou 10/16.

On place un échantillon de 5 kg de granulat et 7 à 11 boulets de 417 g dans un tambour ; après un nombre normalisé de tour du tambour, on récupère le passant P au tamis de 1.6 mm.

Le coefficient Los Angeles est calculé par la formule suivante :

$$LA = \frac{P \times 100}{5000} \dots\dots\dots (IV.2)$$

Les granulats sont qualifiés comme suit :

- LA < 15% ..... très bon ;
- 15% ≤ LA < 20% ..... bon à moyen ;
- 20% ≤ LA < 30% ..... moyen à faible ;
- LA ≥ 30% ..... médiocre.

#### IV.2.6. ESSAIS SUR BETON FRAIS

##### IV.2.6.1. Mesure de l'affaissement (NA 5102)

Cet essai est utilisé pour caractériser l'ouvrabilité du béton ordinaire confectionné.

Il consiste à mesurer l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids après le soulèvement du cône d'Abrams verticalement.

##### IV.2.6.2. Mesure de l'étalement (NA 5105)

Cet essai est utilisé pour caractériser la fluidité du béton, il consiste à mesurer le diamètre d'une galette de béton formée après le soulèvement du cône d'Abrams verticalement (figure IV.3).



Figure IV.3 - Essai d'étalement au cône d'Abrams

##### V.2.6.3. Viscosité plastique ( $\mu$ ) et temps d'étalement de 500 mm ( $T_{500}$ )

Les corrélations rhéologie - ouvrabilité les plus pertinentes sont celles reliant la viscosité plastique au  $T_{500}$ . En effet, Kurokawa et al. [22] ont mis en évidence une

relation qui souligne la corrélation entre la viscosité et le temps d'étalement  $T_{500}$  confirmée d'ailleurs par d'autres auteurs [23- 24].

$$\mu = \rho T_{500} (0,0268 SF - 2,39) / 1000 \dots\dots\dots (IV.3)$$

- $\mu$  : Viscosité plastique du matériau en (Pa.s) ;
- $\rho$  : Masse volumique du béton ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) ;
- **SF** : Etalement en (mm) ;
- $T_{500}$  : Temps que met la galette à atteindre un diamètre de 500 mm (seconde).

L'écoulement d'un BAP à faible viscosité est très rapide au départ puis s'interrompt. Un BAP à grande viscosité continuera à s'étaler lentement pendant une durée plus longue. Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 500 mm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton.

#### IV.2.6.4. Essai de stabilité au tamis

L'objectif de cet essai est d'évaluer les bétons autoplacants vis-à-vis des risques de ségrégation et de ressuage en calculant le poids de la laitance passée au tamis par la formule donnée ci-après (VI.4).

Le mode opératoire de cet essai est décrit dans le paragraphe II.6.4.3.

$$P_{\text{laitance}} (\%) = \frac{\text{Poids de la laitance passée (kg)}}{4.8 \pm 0.2} \dots\dots\dots (IV.4)$$

Le calcul du pourcentage de laitance par rapport au poids de l'échantillon conduit à classer le béton autoplacant de la façon suivante :

- $0\% \leq P_{\text{laitance}} (\%) \leq 15\%$  ..... Stabilité satisfaisante.
- $15\% \leq P_{\text{laitance}} (\%) \leq 30\%$  ..... Stabilité critique.
- $P_{\text{laitance}} (\%) > 30\%$  ..... Stabilité très mauvaise (béton inutilisable).



Figure IV.4 - Stabilité au tamis

## IV.2.7. ESSAIS SUR BETON DURCI

### IV.2.7.1. Essai de compression (NA 5075 / NF P 18 - 406)

Les essais de résistance à la compression ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques (16 × 32) cm<sup>2</sup>, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 KN. L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture.

La résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{P}{S} \dots\dots\dots (IV.5)$$

Avec :

- $\sigma$  : Contrainte de rupture (MPa) ;
- $P$  : Charge de rupture (MN);
- $S$  : Section de l'éprouvette (2 × 10<sup>-2</sup>) m<sup>2</sup>.

La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de trois éprouvettes à chaque âge d'essai.

### IV.2.7.2. Essai de traction par fendage : (NA 5108 / NF P 18-408)

Cet essai, appelé aussi essai Brésilien, consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse, cet effort de compression induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices.

Cet essai a été effectué sur des éprouvettes cylindriques (16 × 32) cm<sup>2</sup> à l'aide de la même presse de l'essai de compression mené d'un dispositif spécifié.

La résistance à la traction  $f_{tj}$  est définie par la relation suivante :

$$f_{tj} = \frac{2P}{\pi DL} \dots\dots\dots (IV.6)$$

Avec :

**P** : La charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du plan diamétral vertical ;

**D** : Le diamètre du cylindre ;

**L** : La longueur du cylindre ;

**j** : Âge de béton.

Afin d'étudier l'influence de l'utilisation du déchet de brique broyée sur le comportement mécanique d'un BAP vis-à-vis la compression et la traction par fendage, il a été développé trois variantes de BAP de même composition granulaire avec 5% de DBB, 5% de FS et une troisième variante sans ajout (témoin).

#### IV.2.7.3. Porosité totale

Cet essai consiste à sécher à 105°C, un échantillon de débris de l'essai d'écrasement en compression d'une éprouvette à l'âge de 28 jours. On mesure ensuite la porosité totale de cet échantillon après sa saturation en eau.

La porosité totale P (%) est donnée par la formule suivante :

$$P(\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \dots\dots\dots (IV.7)$$

Avec:

**M<sub>1</sub>** : Masse de l'échantillon séché ;

**M<sub>2</sub>** : Masse de l'échantillon après saturation.

#### IV.2.7.4. 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. Ce mécanisme de transfert n'est pas seulement lié à la structure poreuse mais aussi à l'humidité relative du béton. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité).

Etant donné que le remplissage des capillaires et des vides ont lieu en même temps que la montée de l'eau durant l'absorption, seule une combinaison de phénomènes est mesurable et donne une idée de l'absorption d'eau d'un béton.

Pour l'absorption capillaire, les éprouvettes prismatiques ( $7 \times 7 \times 28$ ) cm<sup>3</sup> sont conservées dans une salle à température ambiante pendant 24 heures. Après le démoulage des éprouvettes, elles subissent une déshydratation à l'étuve à 105°C, et doivent être sciées sur une face puis recouverte d'une résine époxy sur les autres faces, pour empêcher toute évaporation d'eau, elles sont ensuite posées sur la face sciée dans un bac rempli de sable saturé d'eau.

On mesure en fonction du temps l'accroissement du poids de l'éprouvette dû à la montée capillaire de l'eau par la formule suivante :

$$AC = \frac{100 \times P}{S \sqrt{t}} \dots\dots\dots (IV.8)$$

Avec :

**P** : Poids d'eau absorbée (g)

**S** : Surface sciée en contact avec l'eau en (cm<sup>2</sup>)

**t** : Temps en heures (72 heures).

#### IV.2.7.5. Auscultation dynamique (Ultrason) (NA 5027 / NF P 18-418)

C'est un essai non destructif qui permet d'avoir une idée sur la compacité, donc la résistance à la compression et le module d'élasticité dynamique d'un béton.

Il consiste à mettre les deux sondes (émettrice et réceptrice) de l'ultrason entre les deux extrémités d'une éprouvette ( $16 \times 32$ ) cm<sup>2</sup> âgée de 28 jours.

A partir du temps de propagation des ondes soniques à travers la masse de béton, on calcule la vitesse de propagation des ondes à partir de la formule suivante :

$$V = \frac{L}{t} \times 10^6 \dots\dots\dots (IV.9)$$

Avec :

**V** : la vitesse de propagation des ondes en (m/s) ;

**L** : la distance entre les deux sondes en m (pour l'éprouvette testée L = 0.32 m) ;

**t** : le temps de propagation des ondes (μ s).

A partir de cet essai, on peut calculer le module d'élasticité dynamique  $E_{dyn}$  par la formule suivante :

$$E_{\text{dyn}} = \rho V^2 \frac{(1+\nu).(1-2\nu)}{(1-\nu)} \dots\dots\dots (IV.10)$$

Avec :

$E_{\text{dyn}}$  : Module d'élasticité dynamique

$\rho$  : Masse volumique du béton

$\nu$  : Coefficient de poisson (on prend :  $\nu = 0.2$  pour le BO et  $0.22$  pour le BAP).

#### IV.2.7.6. Essai de retrait

Pour mesurer le retrait, des éprouvettes prismatiques ( $7 \times 7 \times 28$ ) cm<sup>3</sup> sont utilisées. On compare, à différents temps, la variation de longueur d'une éprouvette, par rapport à sa longueur initiale à un temps  $t_0$  pris pour origine. Le retrait sera mesuré par deux procédures, la première est le calcul du retrait endogène dû à la seule réaction d'hydratation en empêchant tout échange d'eau entre les éprouvettes et le milieu extérieur; pour cela, les éprouvettes sont enrobées d'une feuille d'aluminium autocollante. La deuxième procédure consiste à mesurer le retrait total libre dû à l'évaporation de l'eau contenue dans le béton, les éprouvettes sont conservées sans moyen de protection.

Pour les deux procédures les éprouvettes sont placées dans une salle à température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et une humidité relative de  $65 \pm 5\%$  et en absence de vent.

A partir des retraits total et endogène mesurés sur les éprouvettes, un troisième retrait peut être calculé par différence en supposant qu'il y ait indépendance des phénomènes : le retrait de dessiccation ou de séchage. Ce retrait peut être considéré comme dû uniquement à l'évaporation de l'eau contenue dans la pâte de ciment hydraté et qui se développe à partir des surfaces exposées à l'ambiance extérieure.

Pour assurer un bon contact entre l'aiguille du comparateur et le béton, des plots ont été ancrés au centre de la surface de contact de l'éprouvette. Les éprouvettes de béton sont placées d'une manière à éviter tout risque d'instabilité (VI.5).



Figure IV.5 - Essai de retrait

### IV.3. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTULISES

#### IV.3.1. ANALYSE DU CRU D'ARGILE ET DE DECHETS DE BRIQUES BROYEES

L'industrie de la brique se base sur deux types d'argiles :

- Argile jaune kaolinique riche en silices et en alumines et qui peut jouer aussi le rôle d'un dégraissant
- Argile grise (mixte) qui assure la plasticité.

Les gisements des deux types d'argile se trouvent à la région de Béjaia (Centre - Est de l'Algérie).

Un mélange homogène, à proportions égales, entre les deux argiles donne la matière argileuse crue, objet, ci-dessous, d'analyse et d'étude à la cuisson.

##### IV.3.1.1. Analyse du cru d'argile

###### IV.3.1.1.1. Analyse chimique

La composition chimique de la matière argileuse, donnée dans le tableau ci-dessous, montre que cette argile possède des teneurs un peu élevées en chaux et en sulfates

**Tableau IV.1 : Analyse chimique du cru d'argile**

Composition chimique en %										
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	PAF
41,28	13,70	4,99	16,44	2,10	0,54	1,01	0,19	2,00	0,63	17,12

###### IV.3.1.1.2. Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique du cru d'argile, résumés dans les tableaux (V.2 et V.3), montre une domination des particules poussiéreuses à plus de 74%. Les particules argileuses représentent 24% de sa composition alors que 1,3% des particules sont dégraissantes.

**Tableau IV.2 : Analyse granulométrique (Fractions - Grossières)**

Diamètre tamis (mm)	5,00	2,00	1,00	0,63	0,200	Cumul sur tamis 0,20
Teneur (%)	2,2	0,56	0,46	0,16	0,66	4,01

**Tableau IV.3 : Analyse granulométrique (Fractions - Fines)**

Diamètre (mm)	1 à 0,063	0,063 à 0,01	0,01 à 0,005	0,005 à 0,001	< 0,001
Teneur (%)	1,27	24,05	50,60	3,28	20,80

### IV.3.1.1.3. Etude du cycle de séchage

Après séchage de 4 heures, les tessons présentent un bon aspect physique, un taux d'humidité résiduelle satisfaisant de 1,2% (Tableau V.4) et une résistance mécanique de 44,6 kgf/cm<sup>2</sup>.

**Tableau IV.4 : Cycle de séchage du cru d'argile**

Temps (mn)	T (°C)	HR (%)	Perte de masse (%)	Retrait de séchage (%)
0	16	54	0	0
60	45	32	4.5	3.1
120	60	28	9.9	4.2
180	80	21	13.1	4.2
240	100	17	14.2	4.2
300	110	15	15.4	4.2
<b>Taux d'humidité résiduelle (%)</b>			1.2	

### IV.3.1.1.4. Propriétés à la cuisson

Les résultats obtenus à 950°C sont meilleurs que ceux des autres températures : Un retrait total de 0,8%, une absorption de 11,2% et une résistance mécanique de 180,7 kgf /cm<sup>2</sup> (Tableau V.5).

**Tableau IV.5 : Caractérisation du cru d'argile à la cuisson**

T(°C)	PAF(%)	R.C(%)	Abs (%)	M V (g/dm <sup>3</sup> )	Coloration	RM/f (kgf/cm <sup>2</sup> )
850	16,6	0,7	14,6	1635	Marron clair	146
900	16,9	1,0	13,1	1672	//	168,2
950	17,2	0,8	11,2	1561	//	180,7

### IV.3.1.2. Analyse du déchet de briques broyées (DBB)

#### IV.3.1.2.1. Analyse chimique du DBB

L'analyse chimique de la poudre de brique issue de broyage des déchets de brique a donné les résultats suivants (Tableau V.6) :

**Tableau IV.6: Analyse chimique du déchet de briques broyées**

Composition chimique de la DBB (%)								
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	PAF
53.78	16.61	6.22	12.88	2.20	0.65	0.87	2.13	3.13

### IV.3.1.2.2. Analyse minéralogique du DBB

La plupart des propriétés des matériaux sont liées à leur minéralogie et leur état cristallin. Pour cela, nous avons procédé à une analyse minéralogique par DRX (diffraction aux rayons X) du déchet de briques broyées.

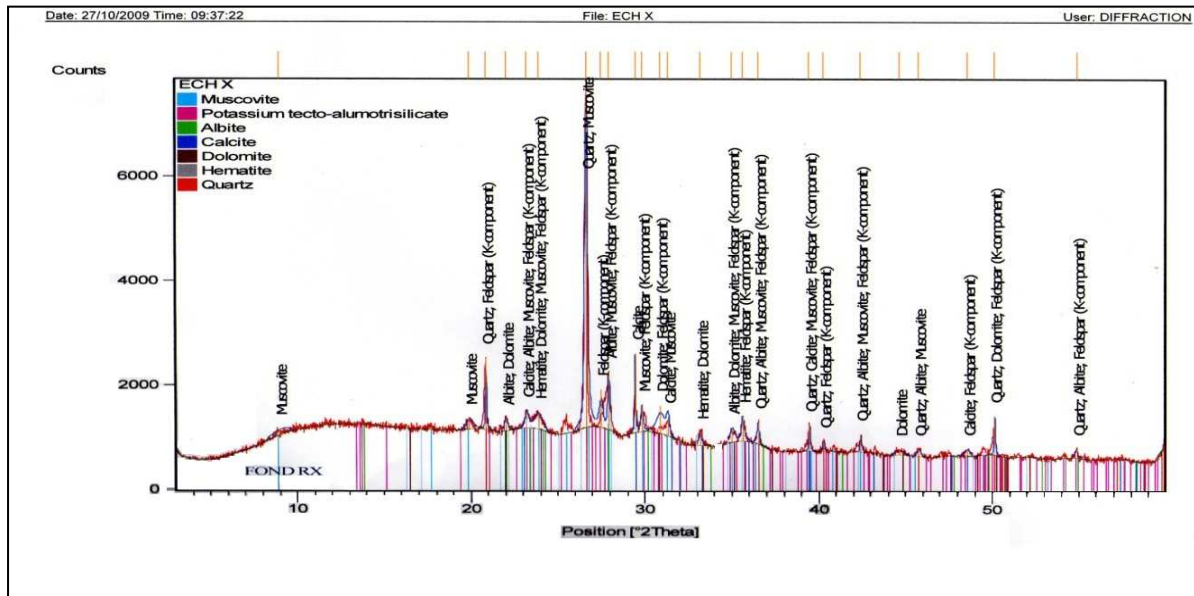


Figure IV.6 - Diffraction de la DBB aux rayons X

L'analyse chimique de la poudre de brique montre une domination notable de la silice  $\text{SiO}_2$  à plus de 53% avec la présence des aluminates à une teneur de 16%.

L'analyse minéralogique du DBB présente une domination des structures amorphes. La diffraction aux rayons X, effectuée sur les fines de déchets de briques de diamètre ( $\varnothing \leq 80\mu\text{m}$ ), montre la présence de certains cristaux surtout de type quartz et muscovite.

La teneur élevée de la silice et la domination des structures amorphes confirme la tendance pouzzolanique du DBB.

### IV.3.2. CIMENT

On a utilisé un ciment de type CPJ-CEMII/A-L 42,5N fabriqué par la société Lafarge Ciment M'sila du groupe LAFARGE.

Ce ciment est conforme à la norme NA 442, à faible teneur en aluminates, il contient 19% d'ajout calcaire et 4% de gypse. Sa classe vraie de résistance est de 48 MPa.

L'analyse chimique et la composition minéralogique de Bogue ont donné les résultats suivants :

Tableau IV.7 : Composition chimique et minéralogique du ciment

Composition chimique (%)		Composition minéralogique (%)	
CaO	62,3	C <sub>3</sub> S	62
SiO <sub>2</sub>	18,07	βC <sub>2</sub> S	16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,5	C <sub>3</sub> A	6,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,3	C <sub>4</sub> AF	11,2
MgO	2,2	<b>Caractéristiques physiques</b>	
SO <sub>3</sub>	2,33	Finesse Blaine (cm <sup>2</sup> /g) EN 196-6	4 300
Na <sub>2</sub> O	0,09	Retrait après 28 jours (µm/m)	< 1 000
K <sub>2</sub> O	0,64	Expansion (mm)	0,6
Chlorides	0,022	Consistance normale (%) EN 196-3	26

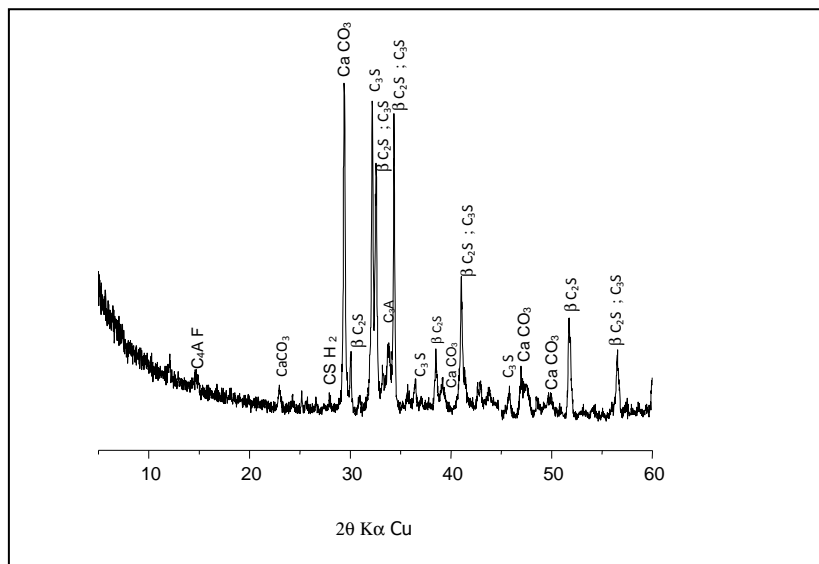


Figure IV.7 - Analyse minéralogique du ciment par DRX

### IV.3.3. FUMÉE DE SILICE (FS)

La fumée de silice est considérée comme l'une des poudres les plus pouzzolaniques vue sa morphologie et sa richesse en matière de silice. Elle a été utilisée dans le cadre de ce travail comme ajout de référence pour la comparaison.

Dans notre recherche, nous avons utilisé une fumée de silice fabriquée par l'entreprise canadienne SKW qui fabrique des alliages de silicium et du ferrosilicium à partir d'un mélange de quartz (SiO<sub>2</sub>), de charbon et de copeaux de bois.

Les différents oxydes constitutifs de la fumée de silice utilisée sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.8 : Analyse chimique de la fumée de silice

Composition chimique en %					
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
92.1	0.25	0.79	0.17	0.96	0.36

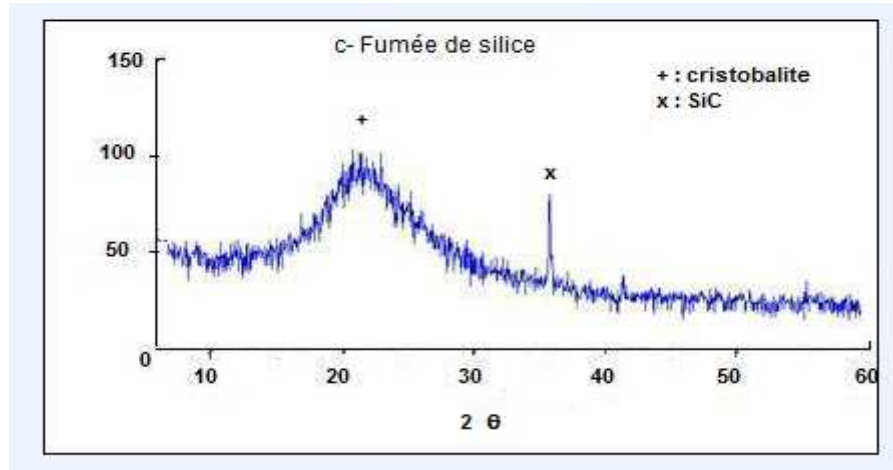


Figure IV.8 - Analyse minéralogique de la fumée de silice par DRX

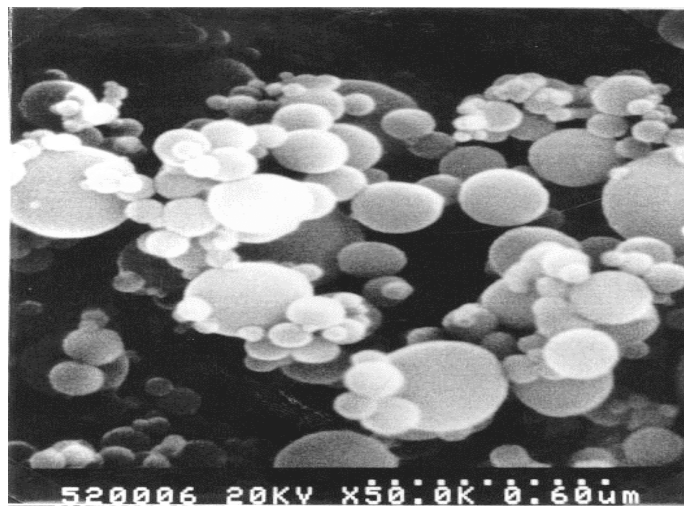


Figure IV.9 - Photo microscopique (MEB) de fumée de silice

L'analyse chimique de la fumée de silice confirme la domination absolue de la silice à 92%. Son analyse minéralogique présente des structures amorphes.

Le diffractogramme X est caractérisé par un halo centré sur la raie principale correspondant à la cristobalite qui est un minéral, composé de dioxyde de silicium de formule SiO<sub>2</sub> avec des traces de : Fe, Ca, Al, K, Na, Ti, Mn, Mg, P.

La cristobalite est stable seulement au-dessus de 1470°C, mais elle peut se cristalliser et persister dans un état métastable à des températures plus basses.

L'analyse par microscopie électronique à balayage montre que la fumée de silice se présente sous forme d'agglomérats de microsphères.

#### IV.3.4. LAITIER DU HAUT FOURNEAU

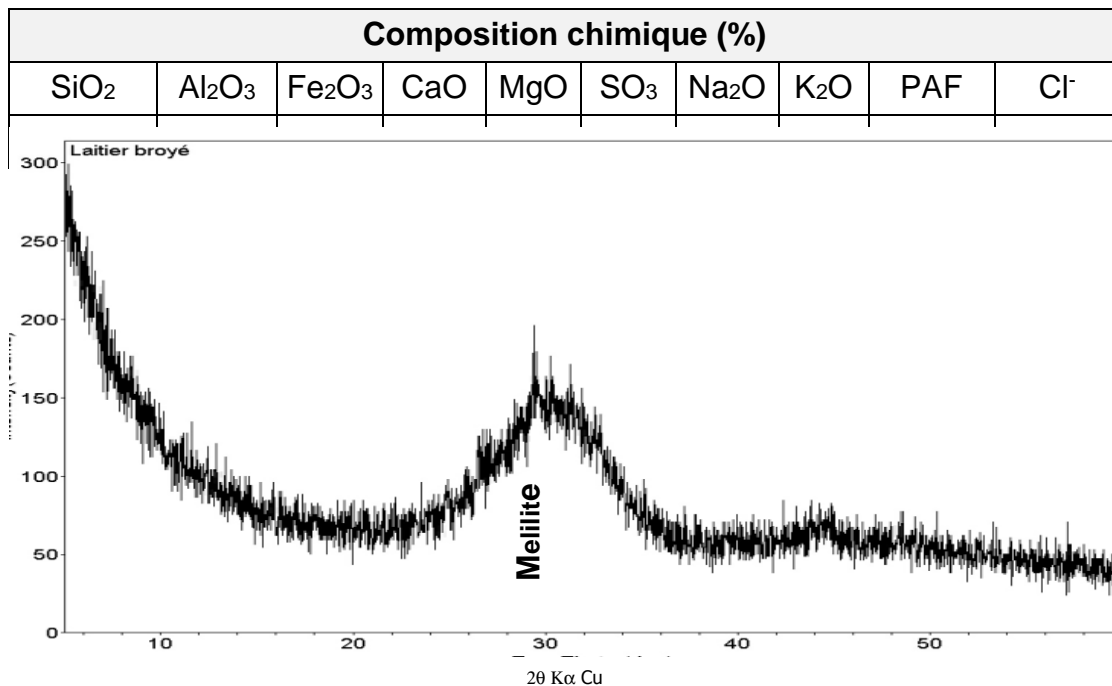
Dans le cadre de cette recherche le laitier utilisé est celui des hauts fourneaux d'El-Hadjar (Est algérien) qui offre la possibilité d'avoir une quantité importante du laitier de l'ordre de 200 000 T/an.

L'addition du laitier de haut fourneau au ciment présente un intérêt économique dans l'industrie du ciment et un intérêt technique dans le domaine de la construction. Le coût énergétique de ce sous-produit est pratiquement nul ; néanmoins il requiert un peu plus d'énergie de broyage que le clinker.

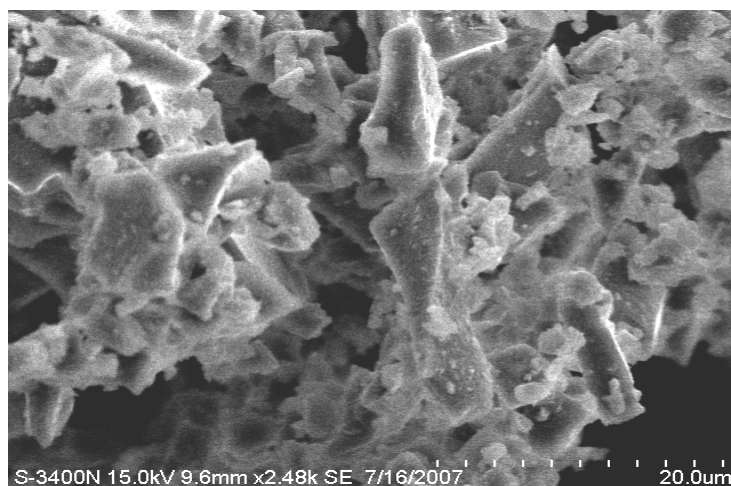
Le laitier granulé de haut fourneau s'obtient par refroidissement brusque par un courant d'eau (jet d'eau), ce qui permet de freiner le processus de cristallisation et d'obtenir ainsi, un matériau vitrifié et granulé. Ce mode de refroidissement transforme le laitier liquide en un granulat fin (procédé ou mode de granulation du laitier) à grains déchiquetés de dimensions inférieures à 5 mm, qui sera utilisé comme ajout au liant ou comme liant hydraulique.

La composition chimique du laitier de haut fourneau (laitier granulé) est proche de celle de ciment portland (CEM I), ce qui permet d'envisager son emploi en qualité de liant comme ajout cimentaire (clinker + laitier).

**Tableau IV.9 : Analyse chimique du laitier**



**Figure IV.10 - Analyse minéralogique du laitier du haut fourneau (El Hadjar) par DRX**



**Figure IV.11 - Photo microscopique (MEB) du laitier broyé (El Hadjar)**

L'analyse minéralogique du laitier du haut fourneau d'El Hadjar présente des structures amorphes. Sa diffraction aux rayons X est caractérisée par un halo centré sur la raie principale correspondant à la mélikite.

#### **IV.3.5. SUPERPLASTIFIANT (SP)**

Lors de ce travail de recherche, il a été utilisé un dispersant de type Poly-Naphtalènes Sulfoné (PNS), classé comme superplastifiant - réducteur d'eau selon la norme NA 774. Il peut donner une réduction d'eau jusqu'à 25% grâce à sa chaîne moléculaire d'environ de 2000.

Ce SP est un liquide marron, d'une densité de 1,22, un extrait sec de 40% et un PH de 7,5.

#### **IV.3.6. SABLE ET GRAVIER**

Afin de réaliser des essais sur béton, nous avons utilisé des granulats issus du concassage d'une roche de calcaire sur la région de KEDDARA (Bomerdès, centre d'Algérie). Un essai Los Angeles est réalisé sur le gravier de la fraction 8/15 a donné une valeur LA = 30%, ce qui nous permet de classer déjà ces granulats d'une qualité moyenne à médiocre.

Le tableau ci-après présente les propriétés physico-chimiques des granulats utilisés pour la confection du béton autoplaçant et du béton ordinaire.

Tableau IV.10 : Propriétés des granulats

	Sable concassé 0/3	Gravillon 3/8	Gravier 8/15
Équivalent de sable (%)	78.5	/	/
Module de finesse	2.7		
Densité absolue	2.62	2.58	2.58
Densité apparente	/	1.32	2.33
Densité en vrac	1.47	1.67	1.4
Taux d'absorption (%)	/	1.8	1.5

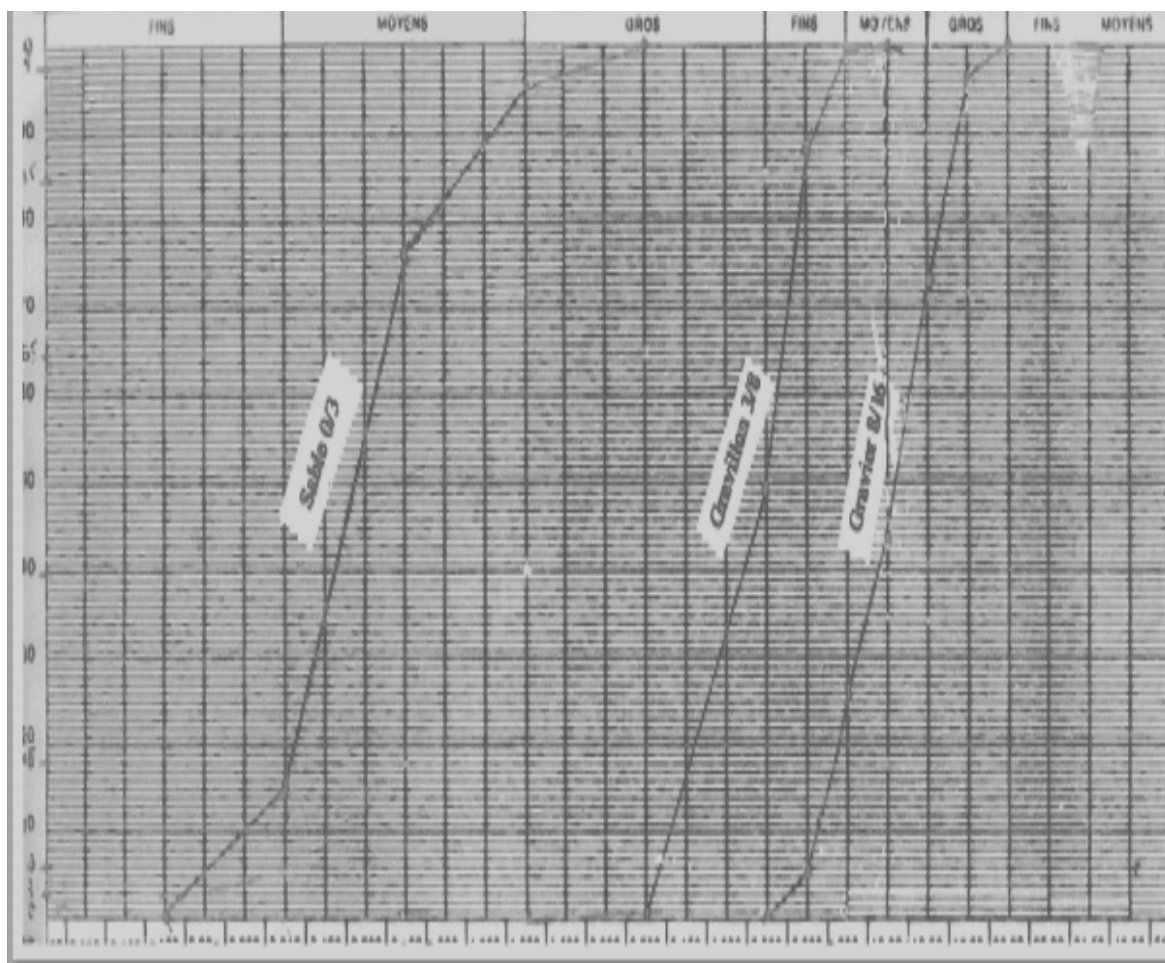


Figure IV.12 - Analyse granulométrique des fractions granulaires

#### IV.3.7. FORMULATION ET CARACTERISATION DU BETON ORDINAIRE

Dans l'objectif d'avoir un béton témoin pour la comparaison, un béton ordinaire vibré a été développé à la base d'un dosage en ciment de  $400 \text{ kg/m}^3$  et d'un rapport  $E/C = 0.5$ .

L'optimisation du squelette granulaire permet de satisfaire au maximum les conditions à priori contradictoires telles qu'une bonne maniabilité à l'état frais, et des caractéristiques mécaniques à l'état durci acceptables.

Ce squelette granulaire a été optimisé en deux étapes :

La première est théorique (méthode Dreux-Gorisse)

La deuxième est expérimentale.

La méthode de Dreux-Gorisse consiste à optimiser le squelette granulaire à partir d'une courbe granulaire de référence, cette dernière est définie par les trois points suivants :

$P_1 (0,0)$  ;  $P_2 (D_{\max}, 100\%)$  et un point de brisure  $P_3$  dont les coordonnées sont :

$$P_3 \begin{cases} X = \frac{D_{\max}}{2} = 7.5 \text{ mm} \\ Y = 50 - \sqrt{D_{\max}} = 46\% \dots\dots\dots \end{cases} \quad \text{(IV.1)}$$

On remarque que cette méthode ne tient pas en compte la forme et la nature de surface des fractions de graviers, et on constate aussi que sa courbe granulaire est continue, malgré que les bétons à granularité discontinue puissent être plus compactes que les bétons à granularité continue.

L'optimisation du squelette granulaire par la méthode expérimentale consiste à chercher le rapport Gravier/Sable, qui développe les meilleures caractéristiques que ce soit à l'état frais ou à l'état durci.

Le principe de cette méthode expérimentale consiste à rechercher la composition optimale avec un rapport E/C = 0.5 et une teneur en ciment de l'ordre de 400 kg/m<sup>3</sup>, et qui permet de minimiser le volume de la pâte de ciment, tout en remplaçant soit une quantité de sable par une quantité de gravier de la fraction suivante (gravier 3/8) ou de remplacer une quantité de gravier de la fraction 3/8 par une quantité de gravier de la fraction 8/15, et ainsi de suite.

**Tableau IV.11 : Composition massique du béton ordinaire**

	Sable 0/3	Gravillon 3/8	Gravier 8/15	Ciment	Eau	E/C
Masse (kg/m <sup>3</sup> )	630	261	851	400	200	0.5

- *À l'état frais :*

Tableau IV.12 : Caractéristiques à l'état frais du BO

Caractéristiques rhéologiques	Résultats
Masse volumique apparente (t/m <sup>3</sup> )	2.32
Affaissement (mm)	90

- *À l'état durci :*

Tableau IV.13 : Caractéristiques à l'état durci du BO

Âge (j)	Masse volumique apparente (t/m <sup>3</sup> )	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction par fendage (MPa)
3	2,32	14,3	2,1
7	2,34	18,2	2,4
14	2,35	24.7	2,8
28	2,38	35	3,2

# **CHAPITRE VI**

**Etude expérimentale - Résultats et discussions**

### **V.1. INTRODUCTION**

L'utilisation de la poudre d'argile cuite, issue du broyage de déchet de brique, est l'une des variantes qui offre la possibilité d'augmenter le volume de la pâte liante d'un BAP afin de favoriser les meilleures caractéristiques rhéologiques avec certaine amélioration de performances mécaniques grâce à son effet filler et pouzzolanique.

Des formulations ont été sélectionnées dans l'objectif de mettre en évidence l'effet de l'introduction de la poudre de brique sur le comportement rhéologique et mécanique des BAP et d'analyser le comportement de ces bétons vis-à-vis le retrait endogène et de séchage.

Des essais d'auscultation dynamique ont permis aussi d'estimer le module d'élasticité dynamique d'un BAP au DBB et le comparer à celui d'un béton ordinaire et celui d'un BAP au FS. D'autres essais comparatifs d'absorption capillaire et de porosité totale sont effectués pour mettre en évidence l'effet filler de la poudre de brique.

### **V.2. OPTIMISATION DE LA TENEUR EN DBB - EVALUATION DES RESISTANCES MECANQUES DES MORTIERS**

Le caractère pouzzolanique des déchets de briques a été évalué suite au calcul de l'indice d'activité pouzzolanique : rapport entre les résistances en compression des mortiers de ciment contenant du DBB et celles du mortier témoin sans ajout.

Les ciments ayant des ajouts pouzzolaniques ont l'avantage de fournir des mortiers dont les résistances augmentent à long terme (mortiers durables). Cette étude vise à optimiser la teneur en déchet de briques broyées, dont l'évolution des résistances mécaniques à la compression et à la traction par fendage de quatre variantes de mortiers a fait l'objet d'un suivi pendant 28 jours d'âge.

Pour réaliser ces essais, les déchets de briques ont été broyés jusqu'à passage intégral au tamis de mailles 80  $\mu\text{m}$ . Ces poudres ont été utilisées comme ajout à raison de 5% à 15% par rapport au poids du ciment dans des mortiers adjuvantés par un SP de type PNS à raison de 2% du poids du ciment, d'un rapport E/C de l'ordre de 0.4.

Tableau V.1 : Composition des mortiers

Constituants	Teneur en DBB (%)			
	0%	5%	10%	15%
DBB (g)	0	50	100	150
Sable (g)	1 500			
Ciment (g)	1 000			
Eau (g)	400			
SP (%)	2			

D'après les figures (V.1) et (V.2), il est constaté que les éprouvettes du mortier avec 5% de déchet de briques broyées ont favorisé les meilleures performances mécaniques en matière de résistance à la compression et à la traction par fendage par rapport aux autres variantes.

Globalement, les valeurs d'indice de pouzzolanité des différentes variantes sont supérieures à 0,9 et la variante du mortier à 5% de DBB a présenté des valeurs supérieures à 1 pendant les premiers 28 jours (Tableau VI.2).

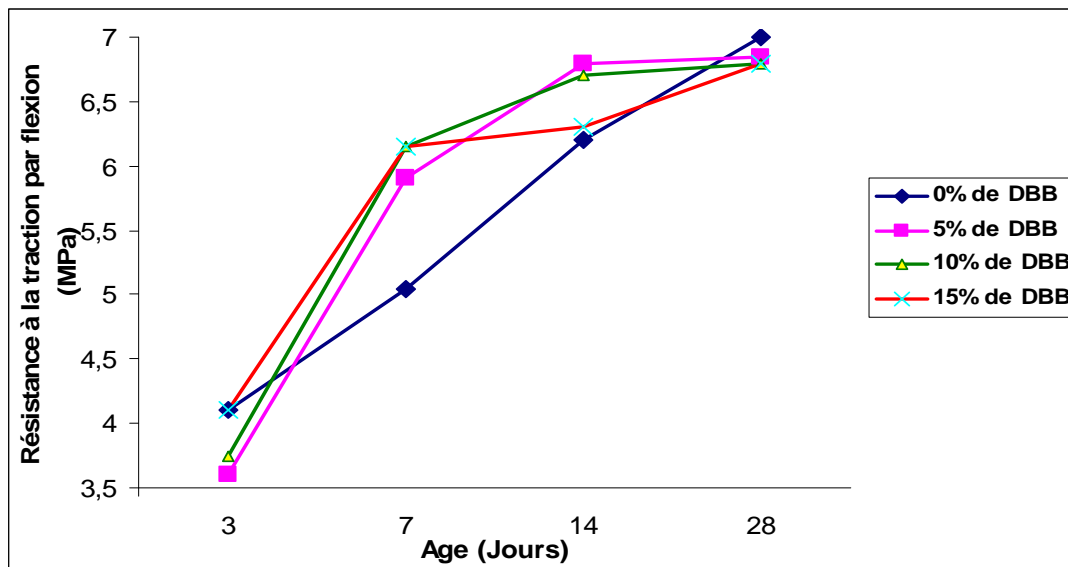


Figure V.1 - Influence de la teneur en DBB sur l'évolution de la résistance à la flexion d'un mortier

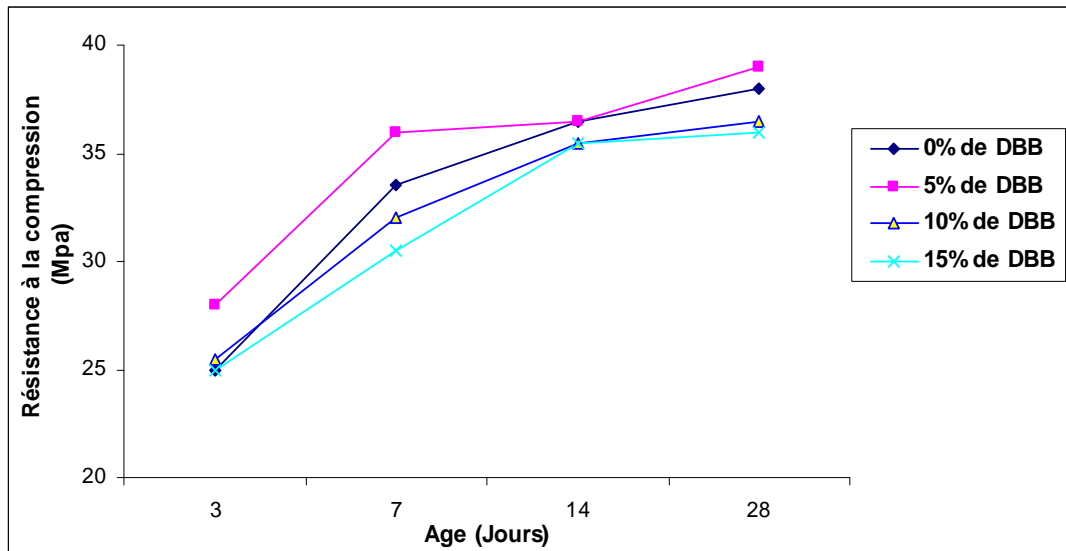


Figure V.2 - Influence de la teneur en DBB sur l'évolution de la résistance à la compression d'un mortier

Tableau V.2 : Indices d'activité pouzzolanique

	Indice de pouzzolanicité			
	03 j	07 j	14 j	28 j
<b>Mortier avec 5% de DBB</b>	1.120	1.070	1.003	1.030
<b>Mortier avec 10% de DBB</b>	0.998	0.955	0.970	0.955
<b>Mortier avec 15% de DBB</b>	0.984	0.907	0.970	0.947

### V.3. MESURE DE CHALEUR D'HYDRATATION

Les mesures indiquées sur la figure (V.3), montrent que la substitution de l'ajout calcaire par la poudre de brique favorise une réduction de la chaleur d'hydratation. Une diminution de l'ordre de (-7,2%) est enregistrée après 120 heures (une réduction de chaleur d'hydratation de 293 à 275), alors qu'avant 24 heures, la chaleur d'hydratation est considérée plus importante pour le cas du clinker avec poudre de brique que celle d'un clinker au calcaire ou clinker au laitier (170 J/g après 12 h et 238 J/g après 24 h). Ce dégagement excessif de chaleur d'hydratation est interprété principalement par la forte présence des aluminates dans la poudre de brique (16,6% de la composition chimique). En effet, l'aluminate tricalcique est le composé de ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du gypse au clinker pour contrôler ces réactions.

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

Cependant, le mélange de clinker avec 10% de laitier a développé des faibles valeurs de chaleur d'hydratation avant 24 h (103 J/g et 190 J/g après 12 h et 24 h respectivement). Alors qu'il a développé un faible niveau de chaleur d'hydratation après 120 h. Il est noté que la teneur en  $C_3A$  du clinker utilisé est de l'ordre de 6% alors que celle de  $C_4AF$  est de 11%.

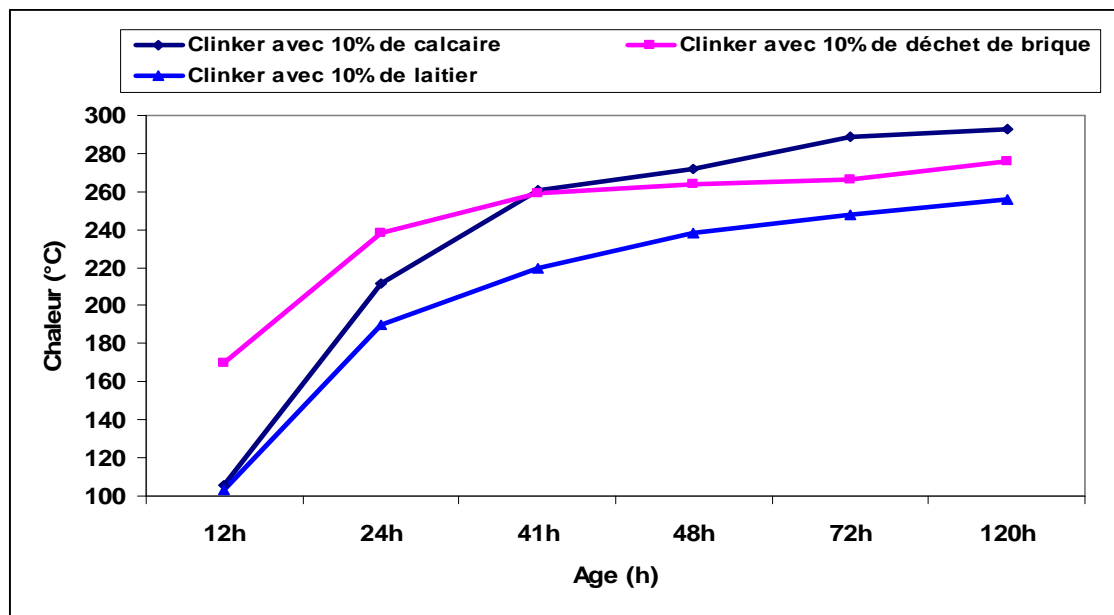


Figure V.3 - Effet de DBB sur l'évolution de la chaleur d'hydratation

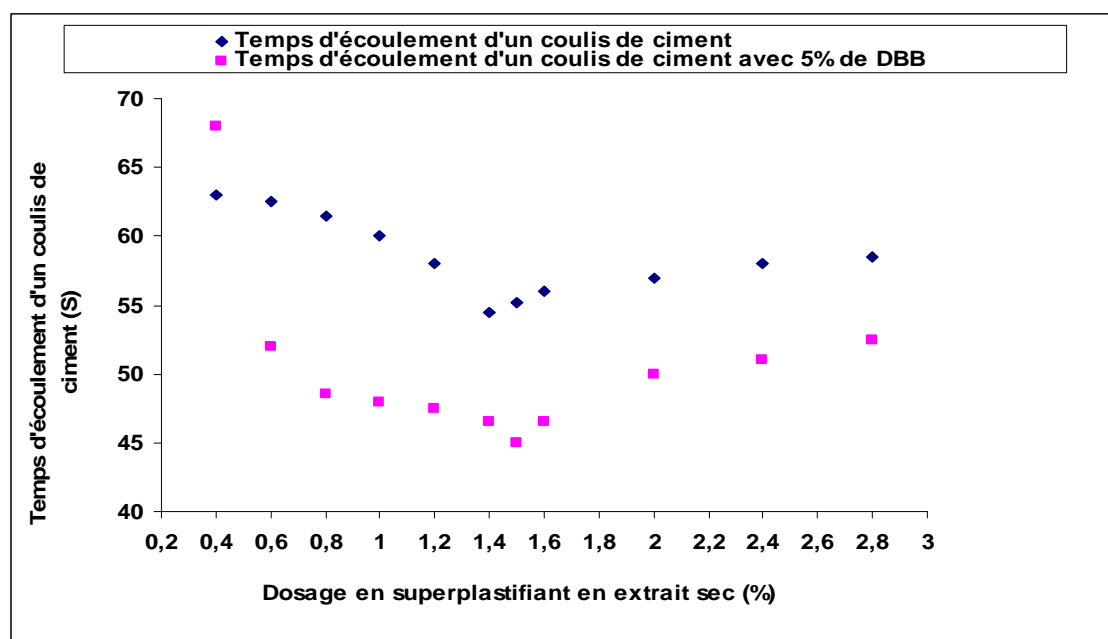
#### V.4. OPTIMISATION DE LA PATE LIANTE

On pourrait penser que tous les ciments portland qui satisfont aux mêmes normes d'acceptation devraient présenter les mêmes caractéristiques rhéologiques quand on les teste avec le même superplastifiant. L'expérience démontre que ce n'est pas toujours vrai, notamment quand le rapport massique Eau/Liant du béton est compris entre 0,30 et 0,40 ; en effet le nombre de cas d'incompatibilité augmente au fur et à mesure que le rapport E/L diminue. Ce phénomène est dû principalement, au fait que la composition chimique et minéralogique et la teneur en sulfates de calcium d'un liant particulier sont ajustées dans des conditions expérimentales très différentes de celles que l'on retrouve dans des bétons qui ont de très faibles rapports E/L où l'on utilise des superplastifiants.

En effet, les normes actuelles sur les ciments ne recommandent pas des essais de compatibilité liant-superplastifiants. Les essais mécaniques sont déterminés sur

mortiers normalisés à rapport E/L de l'ordre de 0,50 et la rhéologie de tels mortiers est surtout contrôlée par l'eau. Dans de tels mortiers, les grains de ciment sont relativement trop éloignés les uns des autres pour influencer réellement la rhéologie de la pâte et il faut attendre un certain temps pour que les premiers produits d'hydratation commencent à interférer avec le libre mouvement des grains de ciment. Par conséquent, on en est réduit à devoir tester les superplastifiants et les ciments de façon séparée.

Une évaluation de l'influence de l'ajout de DBB sur le comportement rhéologique d'un coulis de ciment a été effectuée. Des mesures du temps d'écoulement au cône de Marsh sur coulis de ciment adjuvanté par un superplastifiant ont été enregistrées afin d'identifier le point de saturation et d'apprécier la compatibilité ciment-superplastifiant. Parallèlement, le comportement rhéologique de ce coulis a fait l'objet d'une comparaison à celui d'un coulis de ciment témoin (figure VI.4).



**Figure V.4 - Influence de l'ajout de 5% de DBB sur la variation du temps d'écoulement d'un coulis de ciment en fonction du dosage en SP**

La figure (V.4) montre que le temps d'écoulement d'un coulis de ciment au cône de Marsh diminue avec l'augmentation de la teneur en SP, jusqu'à un certain dosage où à partir duquel le temps d'écoulement du coulis reste constant ou augmente légèrement.

On constate que pour un coulis de ciment sans ajout, le point de saturation est de 1,4% du poids de ciment (en extrait sec), par contre pour le coulis de ciment au DBB

il est de l'ordre de 1.5% du poids de ciment (en extrait sec), avec une diminution de temps d'écoulement de 16% par rapport à celui du coulis sans DBB. Le même point de saturation a été déjà trouvé dans des résultats des recherches précédentes sur un coulis de ciment aux fumées de silice, [60].

Les résultats montrent, aussi, que pour un dosage en SP de 0.4% du poids de ciment, le temps d'écoulement d'un coulis sans ajout est inférieur de 7% par rapport à celui du coulis avec 5% de DBB ; ceci est dû principalement à l'insuffisance du dosage en SP qui ne permet pas de défloculer convenablement l'empilement des grains de ciment et les particules de DBB. À cet effet, on peut conclure que le dosage en SP augmente avec l'augmentation de la teneur en DBB.

Néanmoins, les points de saturation obtenus sur coulis dépassent au maximum de 20 à 25% les dosages efficaces sur béton [61]. Ce dépassement est évidemment en fonction des énergies de malaxage utilisées lors de la confection du coulis et du béton. Il ne faut pas oublier que, dans un béton, le mortier doit avoir une consistance telle qu'il puisse maintenir les gros granulats en suspension et que, dans un mortier, la pâte de ciment doit avoir une consistance telle qu'elle puisse maintenir les grains de sable en suspension, et qu'il faut en outre que les grains de ciment forment une suspension stable dans l'eau.

Quand une de ces trois conditions, ou les trois ensemble, ne sont pas remplies, le béton resseue, et l'on voit apparaître un phénomène de ségrégation, des phénomènes qui ne peuvent évidemment pas être mis en évidence quand on fait des essais sur coulis où seule intervient la stabilité de la suspension des grains de ciment dans l'eau. Ainsi un coulis peut être stable, alors qu'un béton de même rapport eau/liant ayant le même dosage en SP pourra présenter un phénomène de ségrégation et de ressuage et un retard de durcissement inacceptable.

En fait, les essais sur coulis présentent beaucoup d'intérêt dans la mesure où ils permettent, d'une part, de se rendre très rapidement compte si la combinaison liant/SP sera compatible ou non et, d'autre part, de réduire considérablement le nombre d'essais qu'il faudra effectuer sur béton.

#### **V.5. OPTIMISATION DU SQUELETTE GRANULAIRE D'UN BAP AU DBB**

La fluidité et la stabilité sont les deux propriétés principales recherchées d'un BAP. Ces deux caractéristiques peuvent être obtenues grâce à l'utilisation des superplastifiants pour favoriser une meilleure fluidité et déformabilité et des additions

minérales pour garantir une bonne dispersion des gros granulats sans aucune tendance à la ségrégation.

Deux possibilités sont offertes pour assurer un volume élevé de la pâte liante :

La première consiste à augmenter le dosage en ciment (jusqu'à 500 kg/m<sup>3</sup>) [17], ce qui induit l'augmentation du coût de revient d'un mètre cube de béton, vu que le coût du ciment représente généralement 40 à 65% du coût global d'un mètre cube de béton (impact économique), et des risques de fissuration à cause du retrait endogène, résultat d'une réaction exothermique (impact technique). Alors que la deuxième consiste à la substitution d'une partie de ciment par une ou plusieurs additions minérales.

Dans cette étape, on vise l'optimisation de la teneur et la combinaison des gros granulats ainsi que l'identification du rapport volumique sable/pâte optimal qui donne les meilleures déformabilités pour une teneur fixe en SP.

Afin de sélectionner une combinaison adéquate de gros granulats qui améliore la maniabilité et la déformabilité du BAP destiné aux coffrages à ferrailages serrés, trois proportions granulaires ont été considérées. Il s'agit d'une combinaison massique (1) de 2/3 de granulats de la fraction G3/8 et 1/3 de G8/15, une autre (2) qui présente une combinaison massique de 1/2 de G3/8 et 1/2 de G8/15 et enfin une combinaison massique (3) de 1/3 de G3/8 et 2/3 de G8/15 (Tableau VI.3).

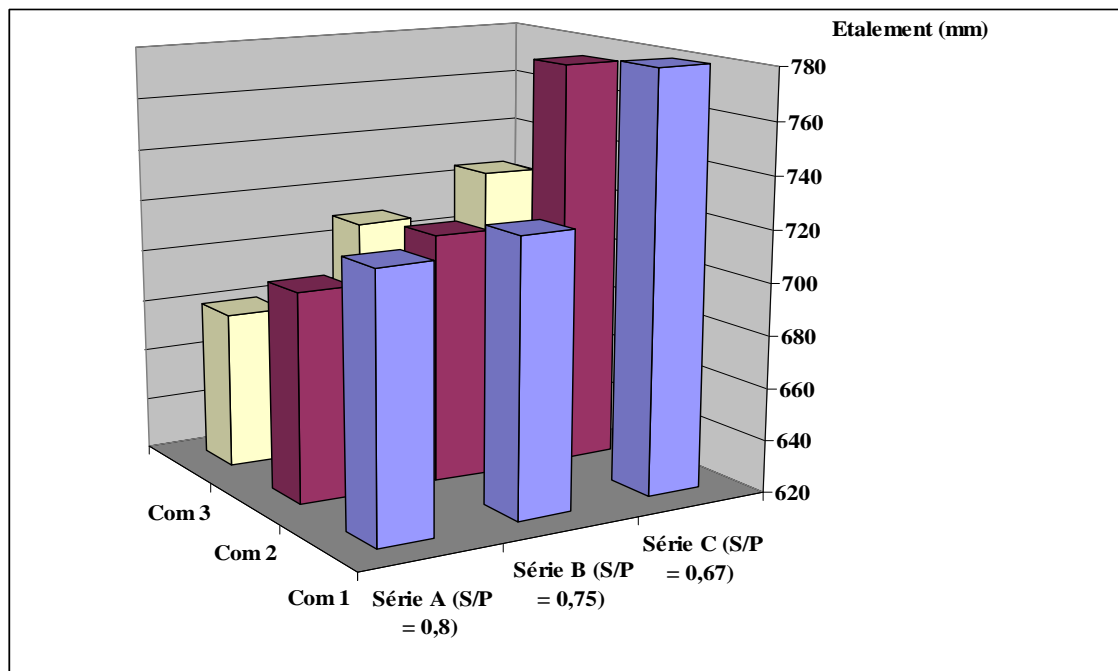
**Tableau V.3 : Formulations des différentes variantes de BAP**

Masse (kg)	Série A (S/P = 0.8)			Série B (S/P = 0.75)			Série C (S/P = 0.67)		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
<b>Sable 0/3</b>	794	794	794	794	794	794	794	794	794
<b>G 3/8</b>	483	363	242	483	363	242	483	363	242
<b>G 8/15</b>	242	363	483	242	363	483	242	363	483
<b>Ciment</b>	500	500	500	500	500	500	550	550	550
<b>Eau</b>	200	200	200	210	210	210	238	238	238
<b>SP</b>	15	15	15	15	15	15	15	15	15
<b>DBB</b>	/	/	/	25	25	25	44	44	44

**Tableau V. 4 : Effet de la teneur en gros granulats et du rapport sable/pâte sur le diamètre d'étalement du béton, avec un rapport E/L = 0.4**

	Série A (S/P = 0.8)			Série B (S/P = 0.75)			Série C (S/P = 0.67)		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
<b>Etalement (mm)</b>	720	700	680	725	715	710	780	775	725
<b>f<sub>c7</sub> (MPa)</b>	34	31	27	36	29	38	22	36	37
<b>Taux de ségrégation (%) (Stabilité au tamis)</b>	23	22	24	7,3	7	9,2	2,5	3	3,5

D'après le tableau (V.4), il est constaté que le BAP avec un rapport Sable /Pâte de 0.67 a favorisé la meilleure stabilité et résistance à la ségrégation (2.5%) par rapport aux deux autres séries, et que BAP avec un rapport S/P de 0.8 a développé une stabilité critique avec un taux de ségrégation supérieur à 15%. Cette ségrégation est le résultat de la réduction du volume de pâte par rapport à celui du sable.



**Figure V.5 - Effet de la teneur en gros granulats et du rapport sable/pâte sur le diamètre d'étalement du béton**

La figure V.5 montre que la combinaison 1 (2/3 de G3/8 et 1/3 de G8/15) a favorisé les meilleures maniabilité et déformabilité par rapport aux deux autres combinaisons granulaires. On constate que pour un rapport sable/pâte de 0.8, la combinaison 1 a une amélioration d'étalement de 2.8% et 6% par rapport à ceux des combinaisons 2 (1/2 de G3/8 et 1/2 de G8/15) et 3 (1/3 de G3/8 et 2/3 de G8/15) respectivement.

Ce résultat se concorde bien avec celui de T. Naadia [62] dans lequel il a trouvé que l'essai d'étalement (qui est inversement proportionnel au seuil de cisaillement) est maximal pour une composition qui correspond à des teneurs en gros granulats (la fraction granulaire la plus grande) de 30 à 35%.

Cependant, pour un rapport S/P = 0.75, la combinaison 1 a une amélioration de 2.1% et 2.8% par rapport à ceux des combinaisons 2 et 3 respectivement.

Également pour un rapport S/P = 0.67, l'amélioration d'étalement de la combinaison 1 est de 5% et 13% par rapport à ceux des combinaisons granulaires 2 et 3 respectivement.

Il a été constaté aussi que la réduction du volume de gros granulats et par conséquent l'augmentation du volume de mortier, contribue significativement à l'amélioration de la maniabilité.

Cette amélioration est due principalement à la réduction de la teneur des gros granulats de la fraction 8/15, car l'augmentation du volume des gros granulats provoque un freinage surtout dans le cas des granulats concassés où le frottement entre les granulats est important.

Concernant l'effet de la variation du rapport S/P, sur la maniabilité des BAP, la figure montre que les formulations de la série C (S/P = 0.67), ont favorisé les meilleures maniabilité et déformabilité par rapport aux formulations des séries A (S/P = 0.8) et B (S/P = 0.75).

La combinaison granulaire (2) de la série C a une amélioration de diamètre d'étalement de 7.1% et 5.6% par rapport à ceux des combinaisons granulaires (A) et (B) respectivement.

Sur la combinaison granulaire (3) on a noté également une amélioration de diamètre d'étalement de la série C de l'ordre de 3% et 2% par rapport à ceux des combinaisons granulaires (A) et (B) respectivement.

L'effet de la variation du rapport volumique sable/pâte de 0.75 à 0.67 semble être plus efficace pour l'amélioration de la fluidité (diamètre d'étalement), dans le cas des faibles teneurs en gros granulats. Par contre, cet effet est très réduit si l'on travaille avec un volume important de gros granulats.

Cette amélioration est due vraisemblablement à l'augmentation du volume de la pâte de ciment; pour la série C la matière cimentaire a augmenté de 13% et 19% par rapport à celles des séries B et A respectivement.

La réduction de la teneur en gros granulats et du rapport sable/pâte s'accompagne d'une augmentation du volume du mortier et de la pâte, et par conséquent la teneur en matière cimentaire. Cette augmentation de la teneur en matière cimentaire conduit à l'élévation de la température du béton due à la chaleur d'hydratation, on a donc remplacé une partie de ciment par un ajout DBB pour pallier l'inconvénient de présence d'une importante teneur en matière cimentaire dans le béton.

## V.6. EFFET DE LA VARIATION DU RAPPORT E/L SUR LA MANIABILITE DES BAP

Pour étudier l'effet de la variation du rapport E/L sur la maniabilité et la résistance à la ségrégation du béton, nous avons choisit la première combinaison de la série B (2/3 de 3/8 et 1/3 de 8/15).

**Tableau V.5 : Effet de la variation du rapport E/L sur la maniabilité et la résistance à la compression**

	BAP 1	BAP 2	BAP 3
Sable 0/3 (kg/m <sup>3</sup> )	794	794	794
Gravillon 3/8 (kg/m <sup>3</sup> )	483	483	483
Gravier 8/15 (kg/m <sup>3</sup> )	242	242	242
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	500	500	500
Eau (l/m <sup>3</sup> )	210	189	168
E/L	0.4	0.36	0.32
SP (kg/m <sup>3</sup> )	15	15	15
DBB (kg/m <sup>3</sup> )	25	25	25
Étalement (mm)	725	675	580
Taux se ségrégation (%)	7.41	4.35	0.5
f <sub>c28</sub> (MPa)	46	50.5	55.5

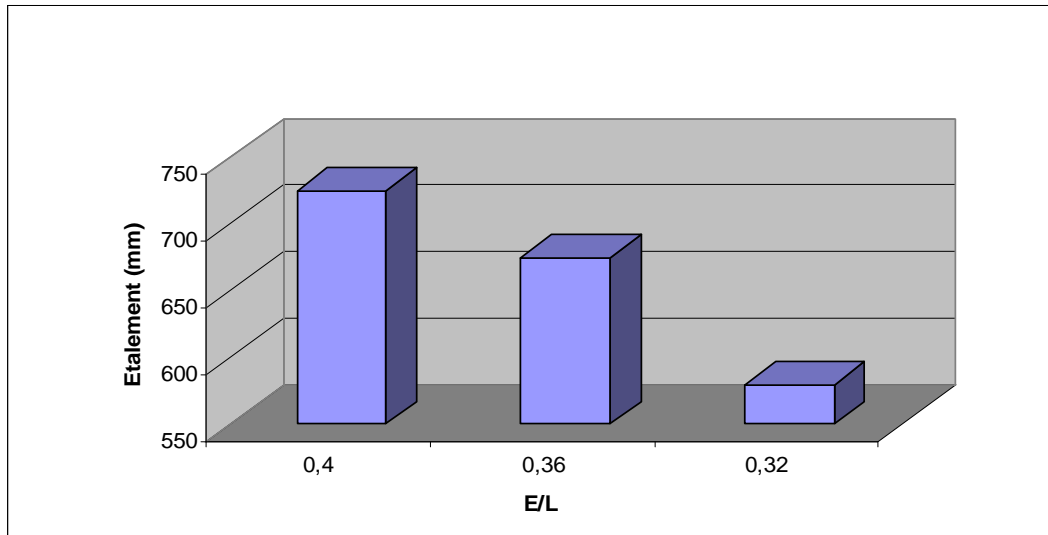


Figure V.6 - Effet de la variation du rapport E/L sur le diamètre d'étalement

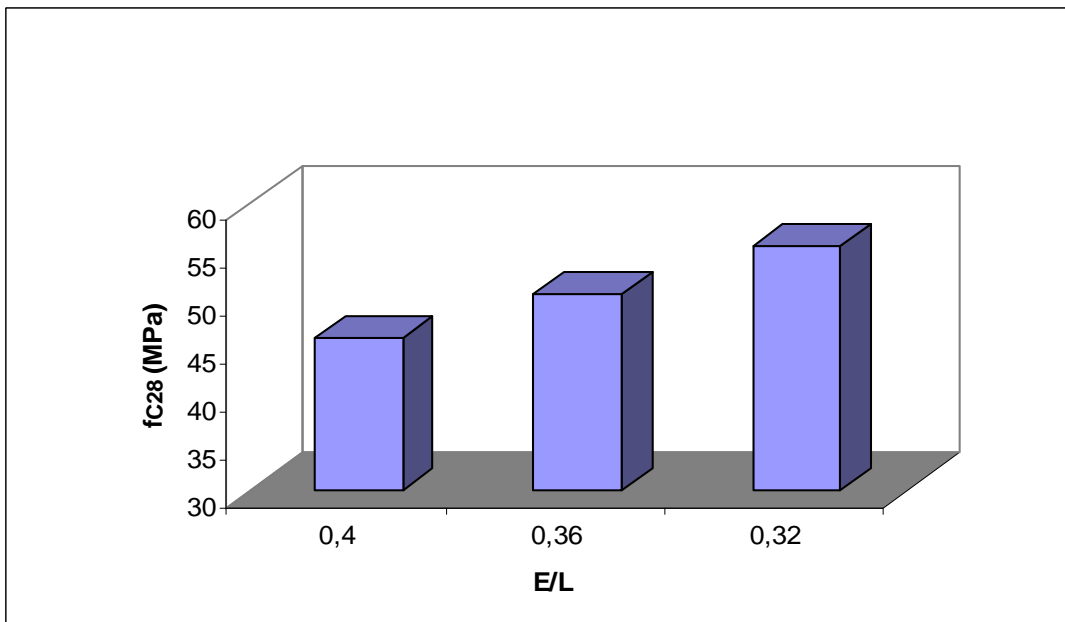


Figure V.7 - Effet de la variation du rapport E/L sur la résistance à la compression au 28<sup>ème</sup> jours d'âge

D'après le tableau V.5 et les figures V.6 et V.7, on constate que la diminution du rapport E/L a influé directement sur les caractéristiques d'un BAP que ce soit à l'état frais ou à l'état durci.

À l'état frais, on observe pour un BAP de rapport E/L = 0.32, une diminution de diamètre d'étalement de 7% et 24% par rapport à ceux des BAP de E/L = 0.36 et 0.40 respectivement. Cette diminution est interprétée par la réduction de la quantité d'eau de gâchage incorporée lors du malaxage. Cette diminution a influé

positivement sur la stabilité et la résistance à la ségrégation d'un BAP, dont le taux de ségrégation d'un BAP de rapport E/L = 0.32 est négligeable.

À l'état durci, la diminution du rapport E/L influe significativement sur la résistance à la compression, on constate pour un BAP de rapport E/L = 0.32 un gain de résistance à la compression de +9.9% et +20.6 % par rapport à celles des BAP de rapport E/L de 0.36 et 0.40 respectivement.

Cette amélioration est due principalement à la diminution de la quantité d'eau de -11% et -20% par rapport à celles employée dans les BAP de rapport E/L de 0.36 et 0.40 respectivement.

Lors de l'hydratation du ciment, on constate un dégagement de chaleur, et par conséquent évaporation d'eau, ce qui provoque une diminution de compacité et de résistance à la compression.

A l'état frais, une partie d'eau introduite dans le béton sert à combler les vides entre les grains du squelette granulaire et du liant, seule la partie restante est susceptible de donner au béton sa maniabilité.

Ainsi, l'augmentation de la compacité du squelette granulaire conduit à mettre moins d'eau pour une ouvrabilité donnée du béton ou à améliorer l'ouvrabilité pour une teneur en eau donnée.

On sait que la quantité d'eau qui correspond un rapport E/C = 0.30, représente à peu près la quantité d'eau nécessaire pour hydrater l'ensemble des grains de ciment, ce qui signifie qu'une quantité de ciment peut rester anhydre dans un BAP HP même à long terme.

On peut dire que le ciment non hydraté joue un rôle granulaire comme granulats inerte ultrafin en plus de sa fonction liante.

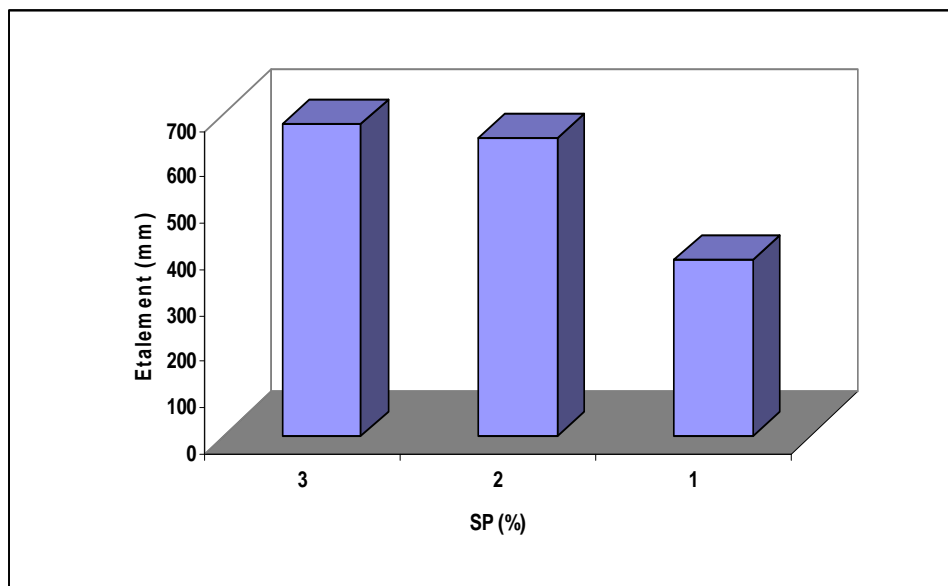
## **V.7. OPTIMISATION DE LA TENEUR EN AJOUT CHIMIQUE**

### **V.7.1. Effet de la variation de la teneur en SP sur la maniabilité des BAP**

Pour étudier l'effet de la variation du dosage en superplastifiant dans les bétons autoplacants, nous avons choisit la combinaison précédente avec un rapport E/L=0.36, (2/3 de G3/8 et 1/3 de G8/15).

**Tableau V.6 : Effet de la variation de la teneur en SP sur les caractéristiques du béton à l'état frais et la résistance à la compression**

Constituant (kg/m <sup>3</sup> )	BAP 1	BAP 2	BAP 3
Sable 0/3	794	794	794
Gravillon 3/8	483	483	483
Gravier 8/15	242	242	242
Ciment	500	500	500
Eau	189	189	189
E/L	0.36	0.36	0.36
SP	15 (3%)	10 (2%)	5 (1%)
DBB	25	25	25
Étalement (mm)	675	645	380
Taux de ségrégation (%)	4.3	3.2	0.2
f <sub>c28</sub> (MPa)	51	53,5	51



**Figure V.8 - Variation du diamètre d'étalement d'un BAP en fonction de la teneur en SP**

La figure V.8 montre que le diamètre d'étalement augmente avec l'augmentation de la teneur en SP.

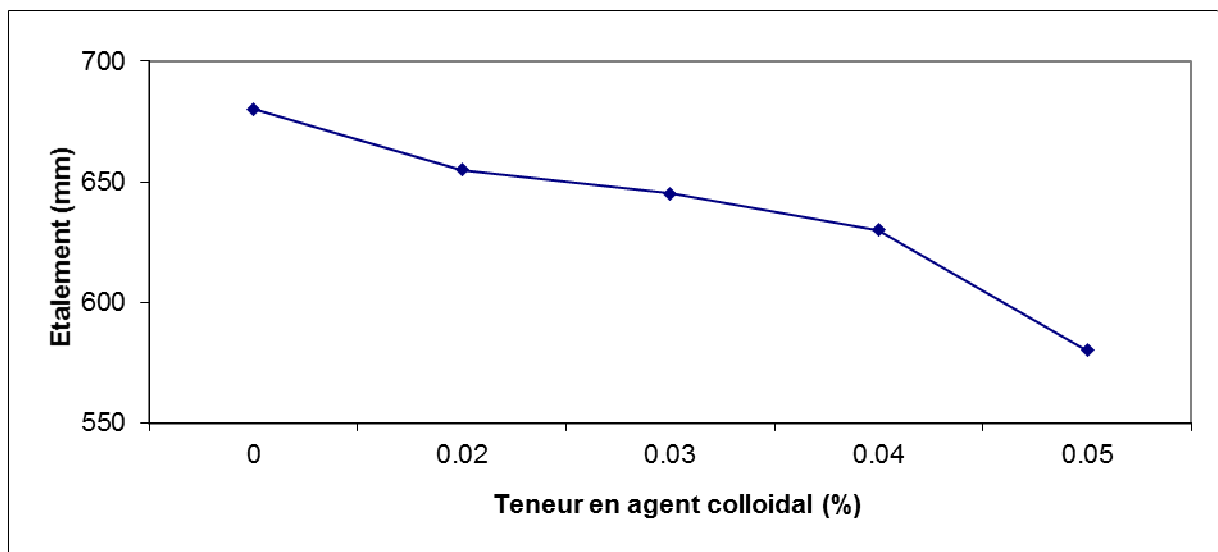
On constate que pour un BAP avec un dosage en SP de 3% du poids de ciment, une amélioration du diamètre d'étalement de 78% et 5% par rapport à ceux des BAP avec un dosage en SP de 1% et 2% du poids de ciment respectivement. À cet effet on constate que pour une teneur en SP de l'ordre de 1% du poids du ciment avec un rapport E/C de 0.36, la confection d'un BAP est quasiment impossible.

### V.7.2. Effet de la variation de la teneur en agent colloïdal sur la maniabilité et la stabilité des BAP

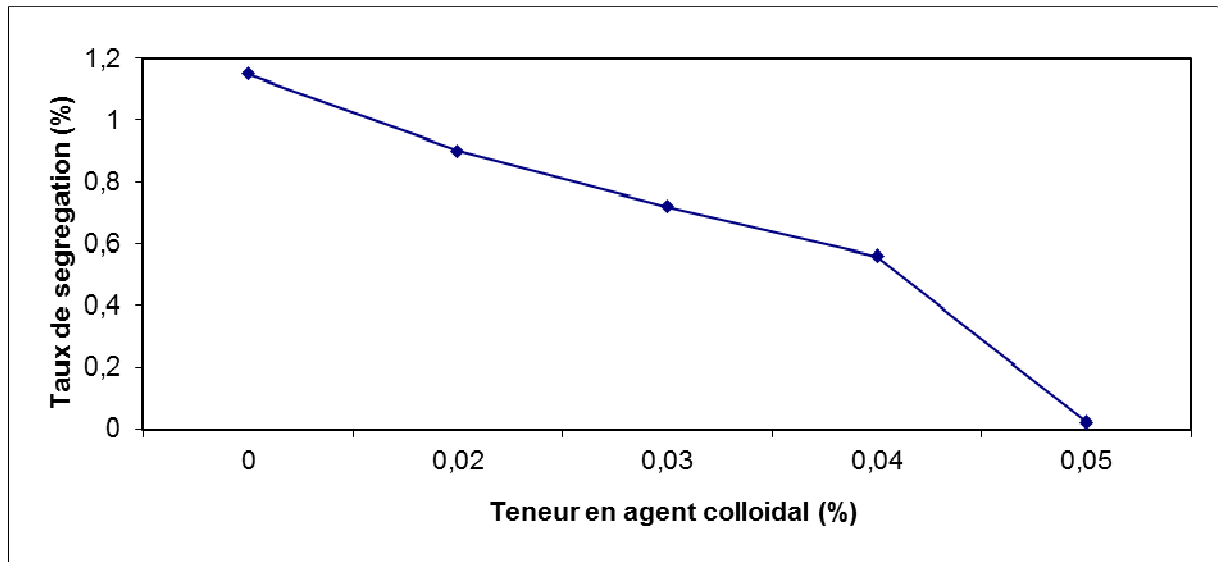
Pour étudier l'effet de la variation de la teneur en agent colloïdal sur les propriétés des BAP à l'état frais (étalement au cône d'Abrams et résistance à la ségrégation), nous avons confectionné cinq bétons avec la formulation BAP 2 ; du tableau V.6, tout en faisant varier la teneur en agent colloïdal de type polysaccharide.

**Tableau V.7 - Effet de la variation de la teneur en agent colloïdal sur les caractéristiques des BAP à l'état frais**

Caractéristiques à l'état frais	Teneur en agent colloïdal (%) / eau				
	0	0.02	0.03	0.04	0.05
Étalement (mm)	680	655	645	630	580
Valeur T <sub>500</sub> (s)	4	5.1	5.6	6	6.5
Taux de ségrégation (%)	1.15	0.9	0.72	0.56	0.02



**Figure V.9 - Effet de la variation de l'agent colloïdale sur le diamètre d'étalement d'un BAP**



**Figure V.10 - Effet de la variation de la teneur en agent colloïdal sur la résistance à la ségrégation**

D'après le tableau V.7 et la figure V.9, on constate que le diamètre d'étalement d'un BAP diminue avec l'augmentation de la teneur en agent colloïdal. Cette augmentation a influé positivement sur la stabilité de ce BAP, car on a remarqué une diminution du taux de ségrégation mesuré à l'aide de l'essai de stabilité au tamis (figure V.10).

On a constaté que pour un BAP avec une teneur en agent colloïdal de 0.05% une diminution de diamètre d'étalement de 15% et une diminution de taux de ségrégation de 98% par rapport à ceux d'un BAP sans agent colloïdal.

L'ajout d'un SP dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

Pour minimiser cet effet, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'avoir une plus grande quantité de liant pour assurer un écoulement sans ségrégation.

L'utilisation d'un agent colloïdal, permet d'obtenir un béton plus visqueux et plus stable. 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. Elle permet de conserver une répartition homogène des différents constituants. l'action de l'agent de viscosité étant d'une certaine façon opposée à celle du SP,

l'optimisation de la fluidité et de la résistance à la ségrégation d'un BAP requiert la sélection d'un couple compatible de SP et agent de viscosité et l'ajustement de leur dosage.

Le taux de ségrégation obtenu pour la variante sans agent colloïdal est négligeable. A cet effet, il est recommandé de ne pas utiliser l'agent colloïdal, vu que la pâte liante a bien joué son rôle en présence d'un SP de type PNS contenant, dans sa composition une faible teneur d'agent colloïdal.

## V.8. PERFORMANCES RHEOLOGIQUES ET MECANIQUES

Afin d'étudier l'influence de l'utilisation du déchet de briques broyées sur les caractéristiques rhéologiques d'un BAP en terme de fluidité et stabilité, ainsi que son comportement mécanique vis-à-vis de la compression et la traction par fendage, trois variantes de BAP de même composition granulaire (sans ajout, 5% de DBB et 5% de FS) ont été développées.

**Tableau V.8 : Compositions des BAP (kg/m<sup>3</sup>)**

	<b>BAP Témoin</b>	<b>BAP avec 5% de FS ou DBB</b>
<b>Sable 0/3</b>	794	794
<b>G 3/8</b>	483	483
<b>G 8/15</b>	242	242
<b>Ciment</b>	500	500
<b>Eau</b>	200	189
<b>FS ou DBB</b>	/	25
<b>SP</b>	7,5	10
<b>E/L</b>	0,40	0,36

### V.8.1. Caractéristiques rhéologiques

Des mesures d'étalement, de vitesse d'écoulement  $T_{500}$ , de résistance à la ségrégation et de masses volumiques ont été prises dans l'objectifs de caractériser l'impact de l'utilisation de la DBB sur les caractéristiques d'un BAP et les comparer à celles d'un BAP aux fumées de silice et un béton autoplaçant témoin (sans ajout).

Tableau V.9: Caractéristiques des bétons à l'état frais

Caractéristiques rhéologiques	BAP Témoin	BAP au DBB	BAP au FS
Masse volumique apparente (t/m <sup>3</sup> )	2,27	2,3	2,35
Étalement (mm)	700	580	600
Valeur T <sub>500</sub> (s)	3	7,5	8
Taux de ségrégation (%)	8	1,5	0,5
Viscosité plastique (Pa.S)	56	103	147

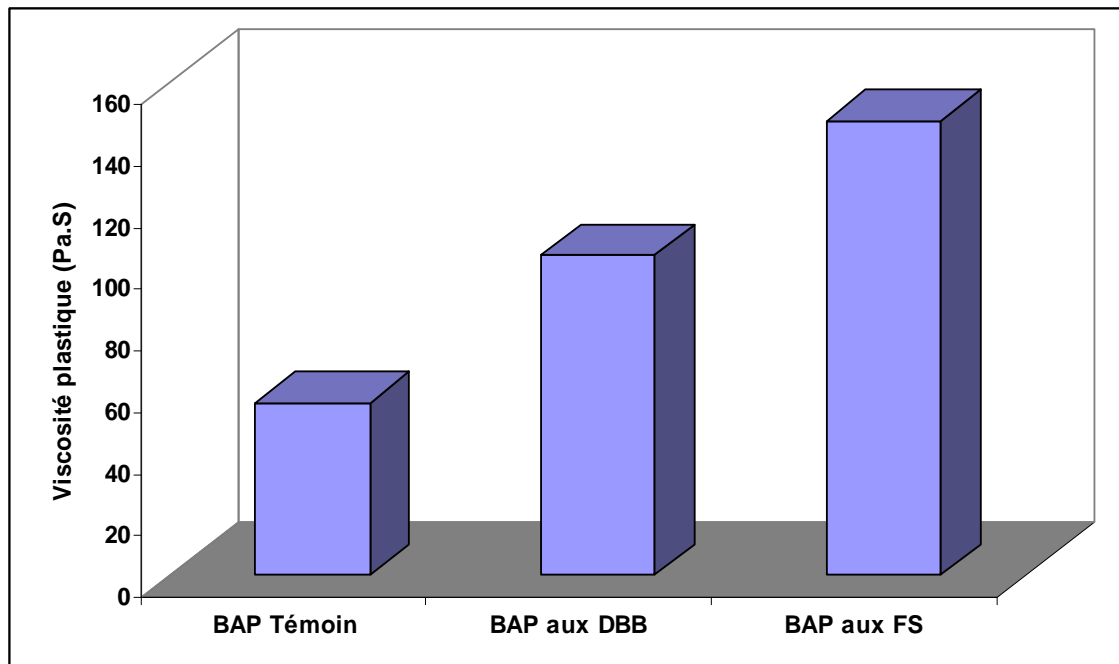


Figure V.11 - Effet de l'ajout de DBB sur la viscosité plastique d'un BAP

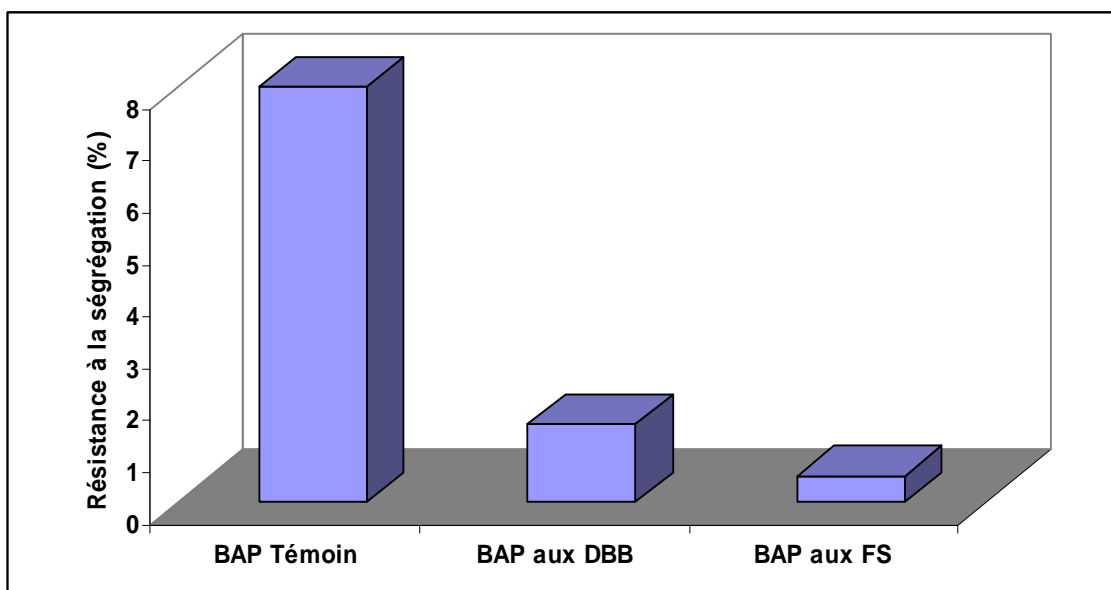


Figure V.12 - Effet de DBB sur la stabilité du BAP

Les résultats obtenus (Tableau V.9) montrent que l'ajout de 5% de DBB provoque une diminution du diamètre d'étalement à 580 mm par rapport à 700 mm pour le BAP témoin. Par ailleurs, une diminution de la résistance à la ségrégation, par l'essai de stabilité au tamis, de 8% pour le BAP sans ajout à seulement 1,5% (figure V.12).

Cette bonne stabilité est le résultat de l'amélioration du volume de la pâte liante qui a permis de réduire les risques de ségrégation et de ressuage.

Les deux BAP aux ajouts ont développé des valeurs de  $T_{500}$  entre 7.5 et 8 secondes. La norme EN 12350 – 8 [63] donne des plages de répétabilité et de reproductibilité des valeurs du  $T_{500}$  entre 0 et 6 secondes. Le BAP à 5% de DBB a donné un  $T_{500}$  d'environ 7.5 secondes, supérieure aux valeurs indiquées par la norme EN 12350 - 8. En effet la viscosité est directement liée au  $T_{500}$ , une amélioration de l'ordre de 100% de la viscosité plastique est constatée pour le BAP à 5% de DBB par rapport au témoin (figure V.11).

### V.8.2. Caractéristiques mécaniques

Les résultats des tests mécaniques réalisés sur des bétons autoplaçants de (compression et traction par fendage) sont indiqués par les figures V.13 et V.14 ci-dessous :

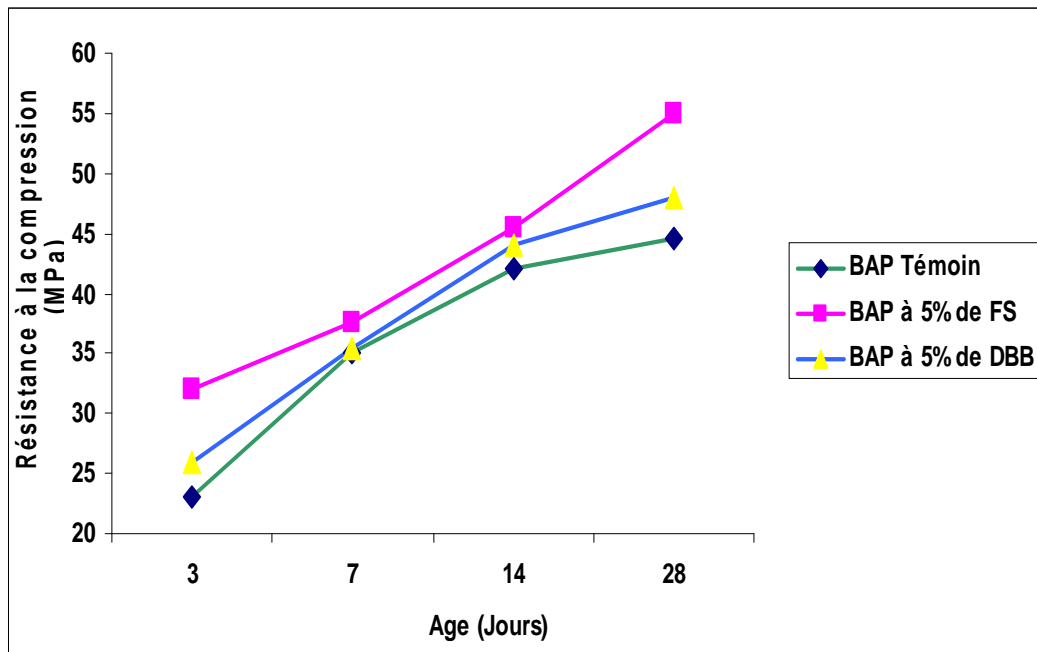
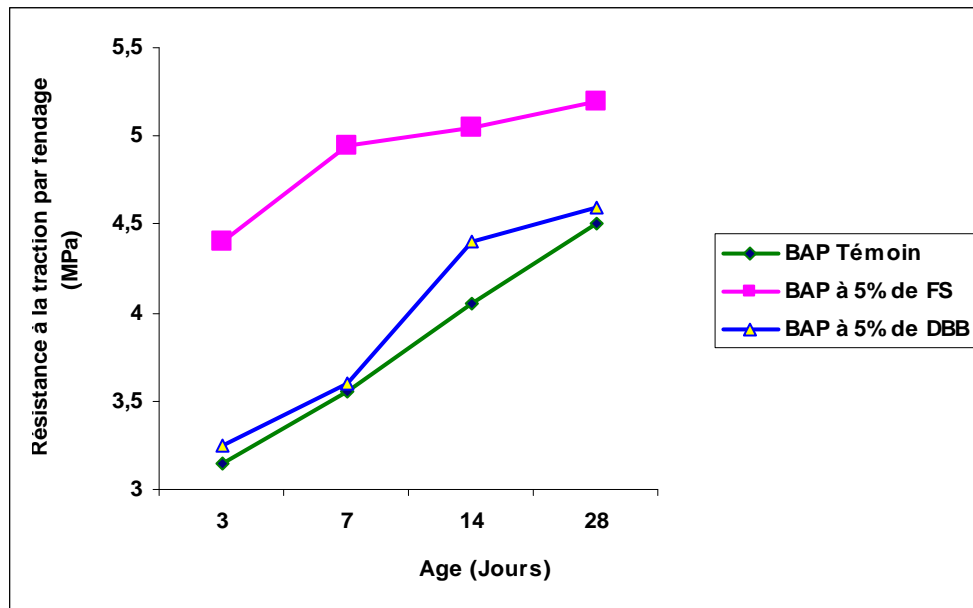


Figure V.13 - Comparaison entre l'évolution de la résistance à la compression d'un BAP aux DBB et celle d'un BAP aux FS



**Figure VI.14 - Comparaison entre l'évolution de la résistance à la traction par fendage d'un BAP aux DBB et celle d'un BAP aux FS**

Les divers résultats présentés dans les figures (IV.13) et (IV.14), montrent que l'évolution des résistances mécaniques à la compression et à la traction par fendage du BAP aux DBB est similaire à celle d'un BAP témoin (sans ajout) alors que les valeurs de résistances mécaniques sont légèrement supérieures à celles du témoin. Une augmentation d'environ 10% est enregistrée sur la résistance à la compression pour un BAP à 5% de DBB par rapport au BAP témoin à 28 j.

Cependant, le remplacement poids pour poids de la fumée de silice par la poudre de brique se traduit par une baisse de la résistance en compression et à la traction par fendage d'environ 12%. Les valeurs ajoutées des DBB sont suffisamment faibles pour autoriser, sans réserve sur le plan mécanique, leur utilisation comme ultrafine dans les bétons à très hautes résistances.

Ces résultats confirment ceux qui ont été déjà obtenus par A. Tafraoui [64] qui a constaté que la substitution de la fumée de silice par le Métakaolin entraîne une baisse de la résistance à la compression de l'ordre de 6,7%. Par contre, il a constaté plutôt une amélioration de la résistance en flexion de 2,6%.

## V.9. POROSITE TOTALE ET ABSORPTION CAPILLAIRE

Tableau V.10 - Comparaison des valeurs d'absorption capillaire et de porosité totale des BAP avec celles d'un BO

	BO	BAP au FS	BAP au DBB
Porosité totale à 28 j d'âge (%)	6,3	5,3	5,5
Absorption capillaire à 3 j d'âge (%)	1,2	1,02	1,1

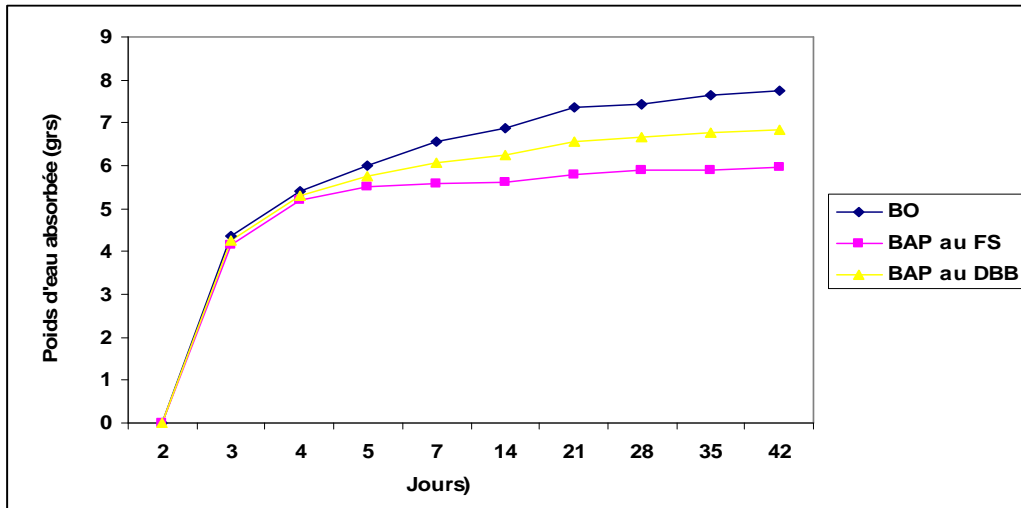


Figure V.15 - Évolution du poids d'eau absorbée en fonction du temps

D'après le tableau V.10 on remarque une diminution des valeurs de la porosité totale et d'absorption capillaire d'un BAP au DBB de 12,7% et 8,3% de celles du béton Ordinaire. Ceci due principalement à la densification du BAP au DBB grâce à l'effet filler des DBB d'une part, et la réduction de la quantité d'eau de gâchage d'autre part. Les valeurs de porosité et de l'absorption capillaire d'un BAP au DBB sont plus élevées de 3,8% et 7,8% respectivement que celles d'un BAP au FS. Ceci est interprété par la grande finesse de la FS (100 fois plus fine qu'une particule de ciment) ainsi que sa forte réactivité pouzzolanique.

La figure V.15 montre que le poids d'eau absorbée évolue très rapidement à jeune âge puis il commence à se stabiliser. On constate qu'à partir du quatrième jour d'âge le poids d'eau absorbé d'un BAP au DBB évolue très légèrement, par rapport à l'évolution de celui d'un béton ordinaire, et que la diminution du poids d'eau absorbé, mesurée après 42 jours, pour le BAP au DBB est de l'ordre de 12% par rapport à celui d'un béton ordinaire, alors que celle du BAP au FS est de l'ordre de 22% par rapport au poids d'eau absorbé par un BO.

Ceci est traduit par la réduction de la quantité d'eau de gâchage d'une part, et la densification des BAP grâce à l'utilisation des fines de DBB ou de FS qui ont contribué avec les grains de ciment anhydres à la réduction des pores capillaires ou la diminution de leurs tailles, sans oublier le rôle pouzzolanique de ces fines dans la création des C-S-H de la deuxième génération. Cet effet est remarquable à partir de la fin de la première semaine d'âge, car on a constaté qu'à partir de cet âge le poids d'eau absorbé commence à se stabiliser.

#### V.10. AUSCULTATION DYNAMIQUE

Pour la détermination du module d'élasticité dynamique, nous avons pris le coefficient de poisson égal à 0.22 pour les BAP et 0.2 pour le béton ordinaire.

**Tableau V.11 : Module d'élasticité dynamique par l'ultrason**

	<b>BO</b>	<b>BAP au DBB</b>	<b>BAP au FS</b>
<b>Vitesse par auscultation dynamique (m/s)</b>	4322	4380	4463
<b>Module d'élasticité dynamique (GPa)</b>	40.7	42,6	44.8

D'après le tableau V.11, on constate une légère augmentation de la vitesse de propagation du son dans le BAP au DBB de 1,4% par rapport à celle du BO et par conséquent, une amélioration de 4,7% du module d'élasticité dynamique par rapport à celui d'un BO.

Par contre, le module d'élasticité dynamique d'un BAP au DDB reste plus faible de 5% par rapport à celui d'un BAP au FS.

Néanmoins, les valeurs de module d'élasticité des BAP sont proches de celle d'un béton ordinaire vibré..

En effet, même si les compositions des BAP se caractérisent par un volume élevé de la pâte liante par rapport à celle d'un béton ordinaire vibré et que les valeurs de modules d'élasticité des pâte sont très faibles (6000 à 25000 MPa) par rapport à celles des granulats (60 000 à 100 000 MPa), la compacité des BAP a permis de compenser cette différence et favoriser une légère amélioration.

Cette bonne compacité des BAP est assurée essentiellement par la forte réduction de la quantité d'eau de gâchage et l'utilisation conjointe de l'addition minérale et du SP, ce qui permet de disperser les grains de ciment et les particules de l'addition minérale. Cette dernière permet de remplir les micro pores capillaires qui existe dans

l'empilement de grains de ciment d'une part, et de favoriser un rôle pouzzolanique très important pendant le processus de durcissement du béton d'autre part.

## V.11. ETUDE DE RETRAIT

Nous présentons ci-après, les résultats de l'étude comparative entre le comportement des deux BAP (au DBB, au FS) et celui d'un BO vis-à-vis du retrait endogène, de séchage et total durant six mois à partir de 48h du coulage des éprouvettes prismatiques ( $7 \times 7 \times 28$ ) cm<sup>3</sup>.

### V.11.1. Retrait endogène

D'après la figure V.16, on constate que le retrait endogène des BAP se développe plus rapidement que celui d'un béton ordinaire, car on a remarqué une augmentation de 54% pour les deux BAP par rapport à celui d'un béton ordinaire après 7 jours d'âge. Cette augmentation est interprétée par la différence de volume de pâte liante (environ 370 l pour les BAP et 330 l pour le BO) d'une part, et par le durcissement rapide des BAP à faible E/L d'autre part.

L'ordre de grandeur du retrait endogène des trois bétons à 180 jours est de 116  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour le BAP au DBB, de 121  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour le BAP au FS et de 130  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour le béton ordinaire vibré.

A partir de ces résultats, on peut donc considérer que le retrait endogène des BAP est légèrement inférieur à celui d'un béton ordinaire.

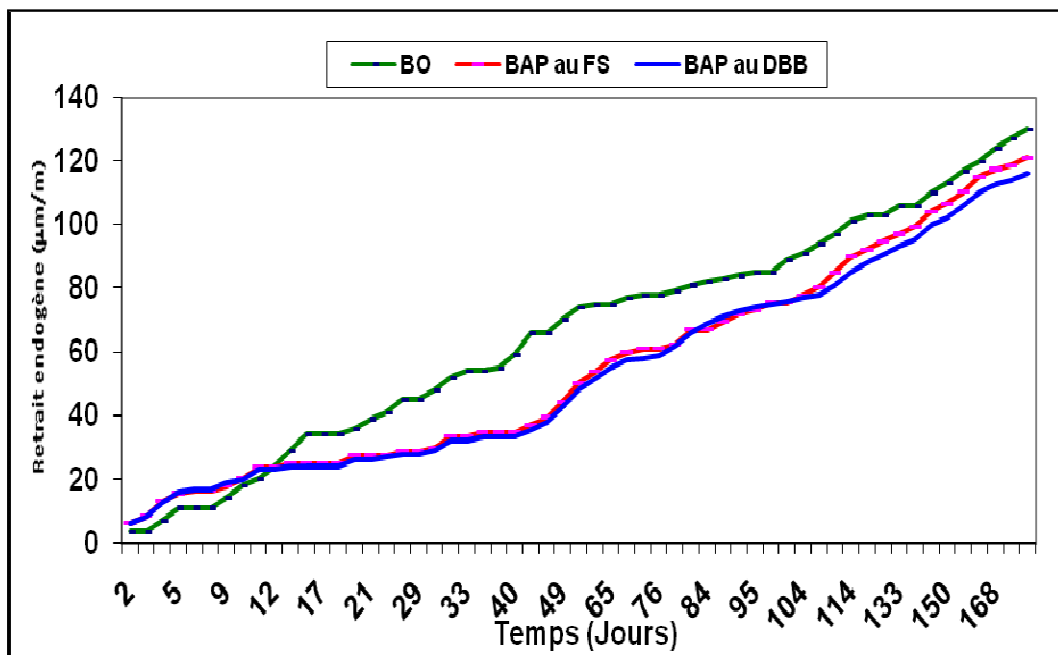


Figure V.16 - Évolution du retrait endogène des BAP et celui d'un BO

### V.11.2. Retrait total

Le retrait total qui représente la somme des deux retraits endogène et de séchage est plus faible de -9% pour le cas du BAP au DBB et de -5% pour le cas de BAP au FS par rapport à celui d'un béton ordinaire (cf. figure VI.17).

D'un point de vue quantitatif, les valeurs expérimentales montrent que les deux BAP présentent un retrait systématiquement inférieur à celui du BO. Cependant, l'écart entre les valeurs expérimentales à 180 jours pour ces bétons étant faible (184  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour les BAP au FS, 177  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour les BAP au DBB et 194  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour le BO), compte tenu de la précision des résultats (à  $\pm 20 \mu\text{m}/\text{m}$  près) on peut considérer que les BAP et le BO présentent un même retrait total.

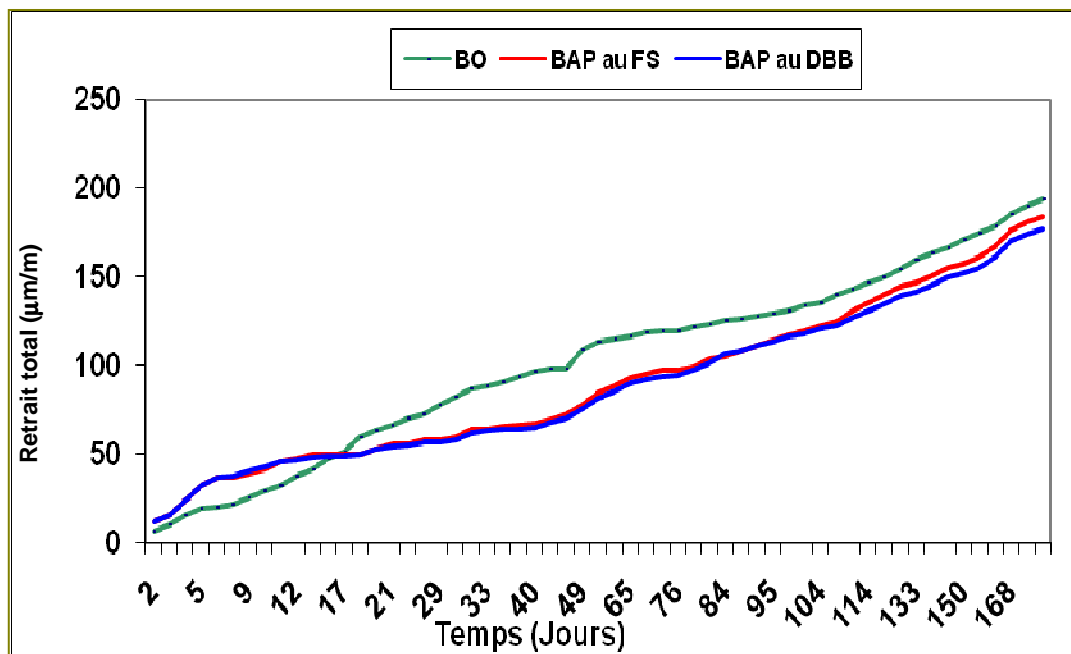


Figure V.17 - Évolution du retrait total des BAP et celui d'un BO

### V.11.3. Retrait de séchage

A partir des retraits total et endogène mesurés sur les éprouvettes, un troisième retrait peut être calculé par différence en supposant qu'il y ait indépendance des phénomènes : le retrait de séchage ou de dessiccation. Ce retrait peut être considéré comme dû uniquement à l'évaporation de l'eau contenue dans la pâte de ciment hydraté et qui se développe à partir des surfaces exposées à l'ambiance extérieure.

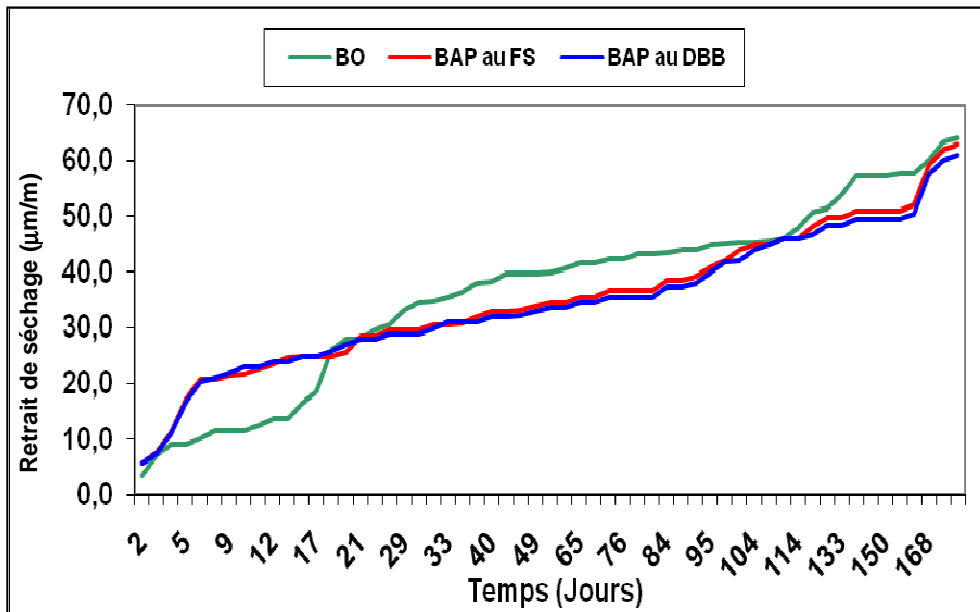


Figure V.18 - Évolution du retrait de séchage des BAP et celui d'un BO

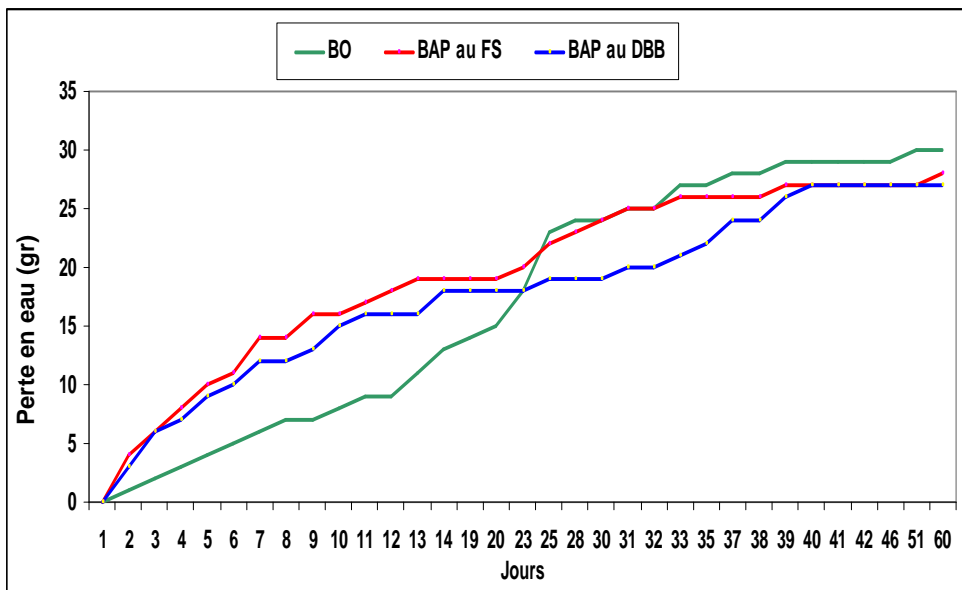


Figure V.19 - Évolution de la perte d'eau des BAP et celle d'un BO

La figure V.18 montre que le retrait de séchage des BAP est un peu plus faible que celui du béton ordinaire, cette légère différence est due principalement à la réduction du rapport E/L de 0.5 à 0.36.

On remarque que le retrait de séchage d'un béton ordinaire à 7 jours d'âge est plus important que celui des deux BAP, ceci est interprété par l'importance de la quantité d'eau dans le BO par rapport à la sa teneur en matière cimentaire. Cet excès d'eau s'évapore lors de l'hydratation de ciment, ce qui provoque l'augmentation du retrait.

Ce constat est confirmé par la figure **V.19**, car on remarque une augmentation rapide du poids d'eau perdu des deux BAP, durant les deux premières semaines de l'ordre de 38% pour le BAP au DBB et 46% BAP au FS par rapport à celui d'un BO.

À partir du 18<sup>ème</sup> jour, on constate une augmentation progressive du retrait de séchage d'un béton ordinaire par rapport à ceux des deux BAP. Une diminution de l'ordre de 11% pour le BAP au DBB et de 7% pour le BAP au FS par rapport à celui d'un BO est enregistrée après 6 mois. Ceci est le résultat d'un durcissement rapide des BAP grâce à la réduction du rapport E/L de 0.5 à 0.36.

L'observation de ces données expérimentales révèle des retraits de séchage équivalents pour les trois types de béton : la différence entre le retrait de séchage des BAP et celui du béton ordinaire correspondant n'est pas significative (61  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour les BAP au DBB, 63  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour les BAP au FS et 64  $\mu\text{m}/\text{m}$  pour le BO) malgré la différence de rapport E/L entre les BAP et le BO.

Dans des conditions d'échange libre avec le milieu extérieur, il est possible de dire que les BAP présentent un retrait au jeune âge plus important que les bétons ordinaires vibrés, et plus particulièrement pour les bétons de faible résistance mécanique ( $E/L > 0.45$ ).

Deux explications peuvent être proposées :

- La présence moins importante d'eau de ressuage pour les BAP, en comparaison aux BO vibrés, qui entraîne un séchage plus rapide de la surface supérieure des échantillons testés. Dans cet essai, cette perte d'eau supérieure peut se traduire directement par une contraction plus importante de l'élément en question.
- La présence d'additions minérales dans les BAP qui conduit ceux-ci à posséder des pores plus fins que ceux des bétons ordinaires. En effet, la pression capillaire étant inversement proportionnelle au rayon des pores, celle-ci est d'autant plus forte dans les BAP, ce qui engendrerait un retrait plus important dans ces bétons, par comparaison aux bétons ordinaires vibrés correspondants.

# **Conclusion générale - Recommandations et perspectives**

La fluidité et la stabilité sont les deux propriétés principales recherchées d'un BAP. Ces deux caractéristiques peuvent être obtenues grâce à l'utilisation des superplastifiants pour favoriser une meilleure fluidité et déformabilité et des additions minérales pour garantir une bonne dispersion des gros granulats sans aucune tendance à la ségrégation.

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons commencé par la caractérisation chimique, physique, physico-chimique et minéralogique des différents matériaux utilisés (ciment, ajouts et agrégats). Nous avons par la suite analysé la pouzzolanité de l'argile cuite issue du déchet de brique broyé par des essais mécaniques sur mortier. Des mesures de chaleur d'hydratation ont été effectuées dans l'objectif d'apprécier l'impact de l'utilisation des déchets de brique broyée comme ajout cimentaire.

D'autres additions ont été utilisées pour la comparaison :

- La fumée de silice comme addition minérale de référence particulièrement pour ce qui concerne l'effet pouzzolanique.
- Le laitier du haut fourneau comme addition minérale de référence pour les essais relatifs aux chaleurs d'hydratation.

Concernant la caractérisation de la DBB, les résultats obtenus sur les mortiers aux additions de fines issues d'argile cuite sont encourageants :

- ◆ Les analyses chimiques du déchet de brique broyée ont montré que les teneurs des silicates et les aluminates sont importantes. Ce qui classe cette poudre comme alumino-silicates.
- ◆ L'analyse au DRX a confirmé la domination de la phase amorphe avec la présence de certains éléments cristallisés comme le quartz, calcite et la dolomite.
- ◆ L'utilisation de 5% de déchets de briques broyées dans le mélange offre une résistance mécanique supérieure à celle d'un mortier témoin. En effet, la chaux hydratée (portlandite) formée lors de l'hydratation des composés du ciment réagit avec le matériau pouzzolanique pour donner les silicates, aluminates et aluminosilicates de calcium hydraté responsables de cette augmentation de résistance. Il s'agit donc de la valorisation d'un déchet pour fournir un produit particulièrement performant.

Ensuite, nous avons enchaîné le travail expérimental par des essais d'optimisation de la pâte liante, la teneur en gros granulats, sable et liant, en fixant le rapport E/L et la teneur en ajout chimique.

Suite à cela, nous avons réalisé des essais comparatifs entre les caractéristiques rhéologiques et mécaniques d'un BAP aux déchets de brique broyée et celles d'un BAP aux fumées de silice et un autre BAP témoin (sans ajout). Des essais comparatifs de retrait, d'absorption capillaire et de porosité totale ont été réalisés aussi sur les deux variantes de BAP aux ajouts et une variante de BO vibré..

Les résultats expérimentaux, obtenus dans ce travail, montrent qu'il est tout à fait possible de fabriquer un BAP avec des déchets de briques broyées présentant les meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques dans les conditions Algériennes.

Au niveau des propriétés rhéologiques : il est noté ce qui suit :

1. À l'essai au cône d'Abrams, le BAP, du fait de sa fluidité s'étale et forme une galette avec un diamètre qui dépasse souvent les 540 mm.
2. La composition d'un BAP nécessite un poids de particules fins d'environ  $700 \text{ kg/m}^3$ , un rapport G/S variant entre 0,8 et 1,05, des granulats de diamètre maximal de 15 mm.
3. Il est prouvé aussi que la diminution du rapport volumique sable/pâte de 0,8 à 0,67, obtenue grâce à l'enrichissement de la pâte liante par l'ajout des fines du déchet de brique broyée, permet l'obtention des meilleures valeurs d'étalement au cône d'Abrams avec des faibles taux de ségrégation estimés avec l'essai de stabilité au tamis.
4. La composition massique de 2/3 de la fraction granulaire 3/8 et 1/3 de la fraction granulaire 8/15 a développé des meilleures performances rhéologiques des BAP.
5. L'ajout des fines issues d'argile cuite dans la composition d'un BAP favorise une amélioration notable ses propriétés rhéologiques (fluidité et stabilité du mélange)

Au niveau des propriétés mécaniques :

1. L'introduction de DBB dans le BAP lui confère des résistances mécaniques (à la compression et à la traction par fendage) meilleures que celle d'un BAP témoin ;
2. En outre, les caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité et le retrait des BAP aux DBB sont conformes aux propriétés des bétons ordinaires et sont évalués de manière comparable par les règlements existants ;
3. Les BAP développent, pratiquement, les mêmes niveaux de retrait endogène et total que le béton ordinaire. Ils présentent un retrait de séchage à jeune âge plus important que les bétons ordinaires vibrés, et plus particulièrement pour les bétons de faible résistance mécanique ;
4. Une nette diminution des valeurs de taux d'absorption capillaire et de porosité totale pour les BAP au DBB par rapport à ceux d'un béton ordinaire vibré.

Finalement, bien que ce travail a mis en évidence l'impact de l'utilisation des fines issues des briques broyées sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des BAP, nous suggérons les recommandations pratiques suivantes qui permettront d'ouvrir les portes sur une recherche plus approfondie concernant certains aspects techniques des BAP:

- ✦ Etudier la possibilité d'augmenter le taux de substitution en déchet de brique au-delà de 10% en utilisant un ciment portland CPA-CEM I ;
- ✦ Approfondir la recherche en prenant en compte d'autres indicateurs de durabilité tels que : la porosimétrie au mercure, la perméabilité à l'eau et au gaz, résistance aux agents agressifs (sulfates, chlorures, carbonates..) ;
- ✦ Etudier les déformations, fluage et retrait plastique d'un BAP avec poudre de brique ;
- ✦ Utiliser la dernière génération des superplastifiants réducteurs d'eau Polymères Carboxylique d'Ether (PCE) afin de diminuer le rapport E/L au-dessous de 0.32 ;
- ✦ Etudier l'introduction d'un agent colloïdal dans le cas d'un BAP très fluide (étalement supérieur à 800 mm) sans ajout minéral ;
- ✦ Optimiser la teneur en adjuvant retardateur de prise utilisé pour maintenir l'ouvrabilité des BAP dans le cas d'un transport du béton ou bétonnage en temps chaud;
- ✦ Étudier l'effet de la nature de ciment sur la maniabilité et le temps de prise des BAP ;

- ✦ Étudier l'effet de la nature d'agent colloïdal sur la stabilité et la maniabilité des BAP ;
- ✦ Développer des BAP à très hautes performances et des BAP fibrés.

# Références bibliographiques

- [1] "Colloques sur les bétons autonivelants" Centre de Recherche Interuniversitaire sur le béton (CRIB), Université de Sherbrooke, Université Laval, Québec, 1<sup>er</sup> Novembre 1996.
- [2] A.Tagnit-Hamou. "Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons", Cours GCI 712, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 2003.
- [3] C.F. Ferraris, N.S. Martys. "De la pâte de ciment au béton : modélisation et mesures expérimentales des propriétés rhéologiques", National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899 USA, 36<sup>ème</sup> Colloque GFR, vol. n°.12, pp. 226 - 230, 2001.
- [4] T. Sedran. F. De. Larrard. "Mix design of self-compacting concrete", Proceedings of the International RILEM, Conference on Production Methods and Workability of Concrete, Paisley, pp. 439 - 450, Juin 1996.
- [5] A. Abib "Etude de l'influence du laitier sur le dégagement de chaleur des ciments portland et son impact sur le comportement physico-chimique et mécanique des bétons", mémoire de Master, Faculté de Génie Civil / Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), 2013.
- [6] La norme Algérienne NA 442/2000: Ciment – Composition et spécifications et critères de conformité des ciments courants, Edition 03, IANOR 2005.
- [7] M. N. Oudjit. "Réactivité des fumées de silice condensées en présence de chaux ou du ciment portland", thèse de Doctorat ingénieur, Institut National des Sciences appliquées de Toulouse, France, 1986.
- [8] H. Gaher. "Caractérisation des bétons à hautes performances vis-à-vis de la traction indirecte et le retrait", mémoire de Magister, Faculté de Génie Civil / Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), 2004.
- [9] Z. Abib, H. Gaher, F. Kharchi "Effet de la fumée de silice sur les performances d'un béton à hautes performances", Proceeding du 4<sup>ème</sup> séminaire sur les technologies des bétons, Hilton, Alger, 2006.

- [10] S. Kourounis, S. Tsvivilis, P.E. Tsakidiris, G.D. Papadimitriou & Z. Tsibouki. "Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag", Cement and Concrete Research, Vol 37, N°06, pp. 815-822, 2007.
- [11] A. Korpa, T. Kowald et R. Trettin. "Hydration behaviour, structure and morphology of hydration phases in advanced cement-based systems containing micro and nanoscale pozzolanic additives", Cement and Concrete Research, Vol 38, N°07, pp: 955 – 962, Janvier 2009.
- [12] A. El Hilali. "Etude Expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) : Influence des fines calcaires et des fibres végétales", Thèse de doctorat - Université de Cergy-Pontoise, Décembre 2009.
- [13] K. Arroudj, M. N. Oudjit "Caractérisation des mortiers à base des fines de Quartz", Séminaire sur les technologies du béton, hôtel Mercure, Alger 13 et 14 Décembre 2011.
- [14] H. Okamura, K. Ozawa. "Self compactable high performance concrete in Japan", ACI International Workshop on High Performance Concrete, Bangkok, Thailand, 1994.
- [15] M. Hayakawa, Y. Matsuoka, K. Yokota. "Application of superworkable concrete in the construction of 70 story building in Japan", ACI SP 154, Las Vegas, 1995.
- [16] I. Izumi, T. Yonezawa, Y. Ikeda, A. Muta. "Placing 10 000 m<sup>3</sup> super workable concrete for guide track structure of retractable of Fukuoka Dome", Supplementary, Papers, 2<sup>nd</sup> CANMET / ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Las Vegas, 1995.
- [17] Z. Abib. "Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants", mémoire de magister à la Faculté de Génie Civil / Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), 2004.
- [18] P. C. Aitcin. "La compatibilité ciment / superplastifiant", ATILH, Paris, 8 Mars 1996.

- [19] Z. Abib, H. Gaher, F. Kharchi, "Béton autoplaçant : Optimisation de la composition", 1<sup>er</sup> Congrès International sur la technologie et la Durabilité du Béton, Faculté de Génie Civil / Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), 2004.
- [20] K. Ozawa, K. Maekawa, H. Okamura. "The high performance concrete with high filling capacity", RILEM Symposium on Admixtures for Concrete, 1990.
- [21] EN 206 – 9, Règles complémentaires pour le béton autoplaçant, p 33, Juin 2010.
- [22] Y. Kurokawa, Y. Tanigawa, H. Mori et R. Komura. "A Study on the Slump Test and Slump-Flow Test of Fresh Concrete", [Etude sur le test d'affaissement et le test d'étalement du béton frais], Transactions of the Japan Concrete Institute, volume 16, pp.25 - 32, 1994.
- [23] Emborg. "Rheology tests for SCC-How useful are they for the design of concrete mix for full-scale production", [Essais de rhéologie pour les BAP : Comment sont-ils utiles pour la conception de béton pour la production à grande échelle], Proceedings of the 1st inter RILEM Conf, Stockholm, pp.95-105, 1999.
- [24] S. Grünewald et J.C. Walraven. "Rheological measurements on self-compacting fibre reinforced concrete", Proceedings of the Third International Symposium on SCC, Reykjavik, Islande, pp.49 - 58, 2003.
- [25] Projet national de recherche CERIB, béton autoplaçant BAP, France, Octobre 2001.
- [26] K. Manai. "Étude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants", Mémoire de Maîtrise, Université de Sherbrooke, 1995.
- [27] A. Boucetta, M. Behim "Etude de comparative sur l'effet d'une même addition inerte ou chimiquement réactive sur les propriétés des bétons autoplaçants", Séminaire international, l'innovation et valorisation en génie civil et matériaux de construction (INVACO 2), Rabat, Maroc, Novembre 2011.

- [28] M. Yurugi, N. Sakata, M. Iwai and G. Sakai. "Mix proportion for highly workable concrete", Proceedings of the International Conference of Concrete, Dundee, UK, 1993.
- [29] K. H. Khayat, Z. Guizani, "Use of viscosity modifying admixtures to enhance stability of highly fluid concrete", ACI Materials Journal, July-August 1997.
- [30] N. Miura, N. Takeda, R. Chikamatsu, S. Sogo. "Application of super workable concrete to reinforced concrete structure with difficult construction conditions", ACI SP 140, 1994.
- [31] K. awad, A. R. AL Yafi. "Self compacting and self levelling properties of high performance concrete with triple blended binder in UAE", Supplementary Papers, 2<sup>nd</sup> CANMET/ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas, 1995.
- [32] T. Fukute, A. Moriwake, K. Sano, K. Hamasaki. "Development of super workable concrete for multi-functional port structures", ACI SP 154, Las Vegas, 1995.
- [33] F. De Larrard. "Structure granulaire et composition des bétons", Etude et recherche des LPC, OA34, p 414 , 2000.
- [34] D. Rinaldi, T. Hamaide, C. Graillat, F. D'Agosto, R. Spitz, Raft. "Copolymerization of methacrylic acid and poly (ethylene glycol) methyl ether methacrylate in the presence of a hydrophobic chain transfer agent in organic solution and in water", J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem., 47, [12] p. 3045 - 3055, 2009.
- [35] CEBTP, "Bétons autoplaçants, rapport 98 004/98 006", Edition Eyrolles, 1995.
- [36] CARMEUSE, Formation continue actualisante sur la nouvelle technologie des bétons, Rapport pédagogique réalisé par Gilles Escadrilles, responsable pédagogique, France, 17 et 18 Octobre 2001.
- [37] A.M. Neville. "Propriétés des Bétons", traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, Edition Eyrolles, 2000.

- [38] C.Hu et B. Barbieri. "Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel", Science des matériaux et propriétés des bétons, pp.265 - 272, 1<sup>ère</sup> Rencontre Internationale, Toulouse, 5-6 Mars 1998.
- [39] G. Pons, E. Proust, S. Assie. "Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete", Proceedings of 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Island, pp. 645 - 645, 17-20, Août 2003.
- [40] K. Sakata. "Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete", CONSEC 98, International Conference 2, pp.2057 - 2064, Toronto, 1998.
- [41] F. De Larrard, C.F. Ferraris, T. Sedran. "Fresh concrete: a Hershel Bulkley material", Materials and Structures 31, pp.494 - 498, 1998.
- [42] Association Française de Génie Civil (AFGC), "Bétons Auto-Plaçants" Recommandations provisoires, p 63, Juillet 2002.
- [43] Billberg, "Form Pressure generated by self-compacting concrete", Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, Reykjavik, Islande, pp 271 - 280, Août 2003.
- [44] Ovarlez et Roussel. "A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork", Materials and Structures, Vol. 39, n. 2, 2006.
- [45] Fédération française du béton (FFB), "Recommandations de mise en oeuvre des BAP et des BAN", SEBTP, Edition 2003.
- [46] Projet National BAP, Aide à la rédaction de cahier des charges techniques pour le Bétons Auto-Plaçants (BAP), Mars 2005.
- [47] Walraven. "Structural aspect of self-compacting concrete", proceedings of the third international RILEM conference on SCC, Reykjavik, Islande, pp 15 - 22, Août 2003.

- [48] Projet National Français sur les BAP, "Impacts socio-économiques", rapport de synthèse du groupe D, p 39, 2000.
- [49] Synthèse des travaux du projet national BHP 2000 sur les bétons à hautes performances, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, n°298, France, 2005.
- [50] "Recycling concrete and masonry". Environmental Council of concrete - organizations. Information, 1997.
- [51] A. Devenny , FM. Khalaf. "The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete". Masonry International, Vol 12, n°3, pp. 81 - 84, 1999.
- [52] S. Bedjou. "Contribution à la valorisation des déchets de construction : Etude du recyclage des débris de terre cuite", thèse de magister de l'Ecole Nationale Polytechnique, 2003.
- [53] M. Hadjoudja. "Influence des fillers des déchets de briques sur la durabilité à l'eau du béton de sable de dunes", Colloque CMEDIMAT, 06 et 07 Décembre 2005.
- [54] U. Chinje melo et N. Billong, "Activité pouzzolanique des déchets de briques et tuiles cuite", African Journal of Science and Technology (AJST) Science and Engineering Series Vol. 5, No. 1, pp. 92 – 100, 2004.
- [55] Z. Abib, H. Gaher-Abib, F. Kharchi, "Effect of clay fines on the behaviour of self compacting concrete", Engineering, doi:10.4236 / eng. 2013. 52031, Février 2013.
- [56] H. Changling, E. Makovicky, et B. Osaek. "Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin", Applied clay Science, Vol. 9, pp 165 - 187, 1994.
- [57] J. Ambroise, M. Murat, J. Pera. "Investigations on synthetic binders obtained by middle-temperature thermal desiccation of clay minerals". Silicates Industries, Vol. 7, n° 8 pp. 99 - 107, 1986.
- [58] M. Si-Ahmed. "Influence du métakaolin sur la durabilité des mortiers et bétons", 31<sup>èmes</sup> Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan, 29 au 31 Mai 2013.

- [59] Z. Abib, H. Gaher-Abib, F. Kharchi, "Les bétons de hautes performances aux Métakaolins", Séminaire sur les technologies des bétons / ACC / Hôtel Hilton / Alger, Septembre 2006.
- [60] F. Kharchi, Z. Abib, H. Gaher. "خرسانة مرصوفة ذاتيا بمركبات جزائرية", First International Conference of Civil Engineering Sciences / Université d'Assiout / Égypte, 7-8 Octobre 2003.
- [61] Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées -202, France, Mars - Avril, 1996.
- [62] T. Naadia. "Effet de la taille des granulats sur le comportement rhéologique des bétons : Application aux bétons autoplaçants", Revue Algérie Equipement, N°39, pp 21 - 24, Mai 2005.
- [63] EN 12350 - 8, Essai pour béton frais, Partie : "Béton autoplaçant - essai d'étalement au cône d'Abrams", p.7, Novembre 2010.
- [64] A. Tafraoui. "Valorisation du Metakaolin dans la formulation des BUHP, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran, Octobre 2009.