

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA-BEJAIA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
Département de Génie Civil

# MEMOIRE

En vue de l'obtention du Diplôme de Magister en Génie Civil

Option : Matériaux et Structures

## Thème

**Etude et caractérisation d'un béton  
autoplaçant fait à base d'un ciment avec  
ajout d'argile cuite et broyée**

**Présenté par**

M<sup>elle</sup> : BEZZI Tiziri.

**Devant le jury**

Président :	M <sup>r</sup> MAZA Mustapha	M.C.A	U. A/MIRA de Bejaïa
Promoteur :	M <sup>r</sup> CHELOUAH Nasser	M.C.A	U. A/MIRA de Bejaïa
Examineur :	M <sup>r</sup> TAHAKOURT A/Kader	Professeur	U. A/MIRA de Bejaïa
Examineur :	M <sup>r</sup> KADRI Mohamed	M.C.A	U. Boumèrdes
Invitée :	M <sup>me</sup> SOUIDI Fatiha	M.A.A	U. A/MIRA de Bejaïa

Promotion 2011.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier :

Monsieur CHELOUAH Nasser mon encadreur et madame SOUIDI Fatiha ma co-promotrice pour leurs orientations, aides et grandes qualités pédagogiques.

Monsieur MAZA Mustapha, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de soutenance.

Les membres de jury, monsieur TAHAKOURT A/Kader et monsieur KADRI Mohamed, pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'être examinateurs de ce travail.

Monsieur BOUZKRI Layachi, directeur du Laboratoire des Travaux Public Est (LTPE) de Bejaia ainsi que tout le personnel du laboratoire, pour leur accueil et aides.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Je remercie beaucoup mes parents, ma sœur, mes trois frères ainsi que toute ma famille.

Je terminerai par une pensée spéciale à Yacine qui m'a accompagné, aidé et surtout compris tout au long de ce travail.

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
TABLE DES MATIERES	ii
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	vii
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	1
<b>PARTIE THEORIQUE (GENERALITES SUR LES BETONS)</b>	
I.1. INTRODUCTION	3
I.2. CONSTITUANTS DU BETON	3
I.2.1. Ciment	3
I.2.2. Granulats	6
I.2.3. Eau de gâchage	7
I.2.4. Adjuvants	7
I.2.5. Additions minérales	9
I.2.5.1. Ajouts minéraux inertes	9
A. Fillers	9
B. Poussière	10
I.2.5.2. Ajouts minéraux actifs	10
A. Ajouts à hydraulicité latente	10
A.1. Laitiers de haut fourneau	10
B. Ajouts pouzzolaniques	11
B.1. Cendres volantes	11
B.2. Fumée de silice	11
B.3. Autres additions	11
B.3.1. Métakaolin (MK)	12
B.3.1.1. Réaction pouzzolanique en présence de MK	13
B.3.1.2. Intérêt de l'incorporation de MK dans la matrice cimentaire	13
B.3.1.3. Caractéristiques des MK à l'état frais	14
B.3.1.4. Caractéristiques des MK à l'état durci	14
B.3.2. Argile calcinée ou argile cuite broyée (ACB)	16
B.3.2.1. Résistance à la compression des mortiers à 28 jours	16
B.3.2.2. Retrait de dessiccation des mortiers	17
I.3. CONCLUSION	18

<b>PARTIE THEORIQUE (GENERALITES SUR LES BAP)</b>	
II.1. INTRODUCTION	19
II.2. DEFINITION	19
II.3. COMPOSITION D'UN BAP ET SA PARTICULARITE	19
II.3.1. Un volume de pâte élevé	20
II.3.2. Une quantité de fines ( $D < 80\mu\text{m}$ ) importante	20
II.3.3. L'emploi de superplastifiants	21
II.3.4. L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenant d'eau)	21
II.3.5. Un faible volume de gravillon	22
II.4. L'ASPECT EMPIRIQUE DE LA FORMULATION DES BAP	23
II.5. LES APPROCHES DE FORMULATION DES BAP	24
II.5.1. L'approche basée sur l'optimisation des Mortiers	24
II.5.2. L'approche basée sur l'optimisation du volume de pâte	25
II.5.3. L'approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire	26
II.5.4. L'approche basée sur un plan d'expérience	27
II.5.5. L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE	27
II.6. CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS	28
II.6.1. Mobilité en milieu non confiné	28
II.6.1.A. Essai d'étalement (Slump Flow)	28
II.6.1.B. Essai d'entonnoir (V-Funnel)	29
II.6.2. Mobilité en milieu confiné	29
II.6.2.A. Essai de boîte en L (L-Box)	29
II.6.2.B. Essai d'étalement modifié (J-Ring)	30
II.6.3. Stabilité	31
II.6.3.A. Résistance à la ségrégation	31
II.6.3.B. Ressuage	31
II.7. PROPRIETES DES BAP A L'ETAT DURCI	32
II .7.1. Propriétés mécaniques	32
II .7.1.1. Résistance mécanique	33
II .7.1.2. Retrait (état frais, état durci)	34
II.7.1.2.a. Retrait thermique	36
II .7.1.2.b. Retrait endogène	37
II .7.1.2.c. Retrait de dessiccation	37
II .7.2. Propriétés physico-chimiques et durabilité	37
II.8. FABRICATION, TRANSPORT ET MISE EN ŒUVRE DES BAP	38
II.8.1. Fabrication	38
II.8.2. Transport	39
II.8.3. Mise en œuvre des BAP sur chantier	39
II.9. CONCLUSION	41



<b>PARTIE EXPERIMENTALE (MATERIAUX UTILISES)</b>	
I.1. INTRODUCTION	42
I.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX	42
I.2.1. Origines des matériaux	42
I.2.2. Analyses chimiques des matériaux	43
I.2.2.A. Morphologie	43
I.2.2.B. Composition chimique	46
I.2.3. Analyse granulométrique	47
I.2.3.1. Analyse granulométrique par tamisage	47
I.2.3.2. Analyse sédimentométrique	50
I.2.4. Coefficient d'aplatissement	52
I.2.5. Masse volumique	54
I.2.5.1. Masse volumique absolue	54
I.2.5.2. Masse volumique apparente	56
I.2.6. Propreté superficielle	57
I.2.7. Propreté du sable	58
I.2.7.1. Equivalent de sable	58
I.2.7.2. Essai au bleu de méthylène	60
I.2.8. Essai Los Angeles	62
I.2.9. Essai de prise du ciment	63
I.3. CONCLUSION	64
<b>PARTIE EXPERIMENTALE (FORMULATIONS ET PROCEDURES)</b>	
II. ESSAIS DE GACHEES PRELIMINAIRES	65
II.1. Confection des bétons	67
II.2. Essai sur bétons à l'état frais	68
II.2.1. Masse volumique des bétons frais	68
II.2.2. Essai de consistance	68
II.2.3. Essai de ségrégation dynamique	69
II.2.4. Essai de ségrégation statique	69
II.2.5. Le ressuage	70
II.3. Essais sur bétons à l'état durci	70
II.3.1.A. Masse volumique humide des bétons durcis	70
II.3.1.B. Comparaison entre la densité sèche théorique et la densité sèche expérimentale à 28 jours	71
II.3.2. Essai de compression	73
II.3.3. Retrait de dessiccation des bétons	75

<b>PARTIE EXPERIMENTALE (DISCUSSIONS DES RESULTATS)</b>	
III.1. ESSAIS SUR BETONS FRAIS	77
III.1.1. Masse volumique fraîche des BAP	77
III.1.2. Etalement, écoulement et laitance	77
III.2. ESSAIS SUR BETONS DURCIS	79
III.2.1. Masses volumiques humides des BAP	79
III.2.2. Résistance à la compression	80
III.2.3. Retrait de dessiccation	82
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	89
Perspectives de la recherche	90
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	91
REFERENCES NORMATIVES	I
Annexes	VII

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Classification des adjuvants	8
Tableau 2. Réactivité pouzzolanique (mg de $\text{Ca(OH)}_2$ / g de matériau)	13
Tableau 3. Substitutions optimales selon l'âge du matériau	15
Tableau 4. Valeurs préconisées pour les essais selon AFGC	32
Tableau 5. Composition chimique des fines utilisées	46
Tableau 6. Analyse granulométrique du sable 0/3	48
Tableau 7. Analyse granulométrique du gravier 3/8	48
Tableau 8. Analyse granulométrique du gravier 8/15	49
Tableau 9. Analyse sédimentométrique des éléments fins	51
Tableau 10. Coefficient d'aplatissement du gravier 3/8	53
Tableau 11. Coefficient d'aplatissement du gravier 8/15	54
Tableau 12. Classement des granulats suivant leurs coefficients d'aplatissement	54
Tableau 13. Masses volumiques absolues des granulats par la méthode de l'éprouvette	55
Tableau 14. Masses volumiques des fines	56
Tableau 15. Masses volumiques apparentes des granulats	57
Tableau 16. Propreté superficielle des graviers utilisés	58
Tableau 17. Classement des granulats suivant leurs propriétés superficielles	58
Tableau 18. Résultats de l'essai d'équivalent de sable	60
Tableau 19. Comparaison des résultats à la norme EN 933-8	60
Tableau 20. La valeur de bleu pour le sable	61
Tableau 21. Nombres de boulets nécessaires pour chaque classe granulaire	62
Tableau 22. Los Angeles des graviers	63
Tableau 23. Les consistances des pâtes utilisées et temps de début et de fin de prise	63
Tableau 24. Les différentes gâchées selon les différents dosages en superplastifiant	65
Tableau 25. Les gâchées de béton autoplaçant avec différents pourcentages d'argile cuite broyée.	66
Tableau 26. Les formulations des différents bétons autoplaçants	67
Tableau 27. Les masses volumiques fraîches des BAP	68
Tableau 28. Evaluation des masses volumiques humides des bétons	71
Tableau 29. Densité sèche pour chaque type de BAP.	71
Tableau 30. Calcul de la densité sèche expérimentale pour le BAP (0) à 28 jours.	72
Tableau 31. Comparaison entre les densités sèches théoriques et expérimentales pour chaque type de BAP.	73
Tableau 32. Résistances à la compression des bétons autoplaçants	74
Tableau 33. Retraits de dessiccation des prismes des bétons autoplaçants	76

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Résistance relative d'un mortier incorporant du métakaolin	15
Figure 2. Influence de la teneur en Métakaolin sur le retrait endogène (a) et le fluage (b) (taux de chargement 20 % de la résistance à 28 jours), (OPC : Ordinary Portland Cement)	16
Figure 3. Comparaison entre les résistances à la compression à 28 jours obtenues avec 10% et 20% d'ajout d'ACB en fonction des températures de cuisson de cette dernière	17
Figure 4. Variation du retrait de dessiccation des différents mortiers pour un temps de cuisson de 60 minutes	17
Figure 5. Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton	20
Figure 6. Action des superplastifiants-Défloculation des grains de ciment	21
Figure 7. Influence des Agents de viscosité et des Superplastifiants sur l'ouvrabilité des BAP	22
Figure 8. Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle	23
Figure 9. Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré	23
Figure 10. Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité	25
Figure 11. Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2)	25
Figure 12. Essai d'étalement au cône (slump flow)	28
Figure 13. Essai d'entonnoir utilisé pour mesurer le temps d'écoulement du béton	29
Figure 14. Essai de la boîte en L (L-box test)	30
Figure 15. Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring)	30
Figure 16. Essai de stabilité au tamis	31
Figure 17. Essai de ressuage à l'aéromètre	32
Figure 18. Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant	33
Figure 19. Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP (de formulation différente)	34
Figure 20. Phénomène de ressuage	35
Figure 21. Courbe type de déformation au jeune âge d'une pâte de ciment	36
Figure 22. Argile non cuite, broyée (ANCB)	44
Figure 23. Argile cuite broyée (ACB)	44
Figure 24. Structure de l'ACB sous MEB à 2µm et à 500nm.	45
Figure 25. Filler calcaire	45
Figure 26. Courbes granulométriques des différents granulats utilisés	49
Figure 27. Courbes granulométriques du ciment et des additions minérales utilisées	51
Figure 28. Distribution granulaire des particules d'ACB.	52
Figure 29. Essai Equivalant de sable	59
Figure 30. Test au bleu de méthylène	61
Figure 31. Essai d'étalement des bétons autoplaçants	69
Figure 32. Essai de la boîte en L	69
Figure 33. Essai de stabilité au tamis	70
Figure 34. Vérification du ressuage du béton autoplaçant à l'état frais	70
Figure 35. Essai d'écrasement d'une éprouvette de BAP(15) à l'âge de 7 jours	74
Figure 36. Les trois morceaux obtenus après l'écrasement des trois éprouvettes de BAP(15) à l'âge de 7 jours	74
Figure 37. Masses volumiques des bétons autoplaçants à l'état frai	77
Figure 38. Essai d'étalement des bétons autoplaçants	77
Figure 39. Essai de la boîte en L des bétons autoplaçants	78
Figure 40. Essai de stabilité au tamis des bétons autoplaçants	79
Figure 41. Masses volumiques humides des bétons autoplaçants	79
Figure 42. Evolution de la résistance à la compression des BAP	81
Figure 43. Retrait de dessiccation du BAP (0)	83
Figure 44. Retrait de dessiccation du BAP (5)	84
Figure 45. Retrait de dessiccation du BAP (10)	84
Figure 46. Retrait de dessiccation du BAP (15)	85
Figure 47. Retrait de dessiccation du BAP (20)	85
Figure 48. Retraits de dessiccation des différents BAP	86

## INTRODUCTION GENERALE

---

Le choix des bétons, dans la construction d'ouvrages, est presque exclusivement lié au coût du matériau. Les bétons standard ont des propriétés et des caractéristiques limitées, et parfois insuffisantes pour la réalisation d'ouvrages particuliers [7].

Beaucoup de structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle.

Afin d'adapter les bétons à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de bétons se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (ségrégation et ressuage faibles), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité.

Ces bétons désignent des bétons très fluides, homogènes et stables, mis en place sans vibrations. Leur compaction s'effectue par le seul effet gravitaire, ils épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes d'où le qualificatif d'«autoplaçant».

Les bétons autoplaçants (BAP) ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon. Leur objectif était d'augmenter la cadence de travail en réduisant l'effectif du personnel sur chantier et le temps de mise en œuvre [37].

De nombreuses études actuelles ont pour objectif de trouver la bonne formulation des BAP, obtenue par l'ajout d'un superplastifiant dont l'excès peut entraîner la ségrégation. Cette dernière peut être évitée par l'ajout d'un agent de viscosité et l'introduction d'un volume de fine (additions minérales) nettement supérieur à celui d'un béton ordinaire [37].

### **Situation du problème**

L'étude de la composition d'un béton autoplaçant, revient à définir le mélange optimal des granulats, du dosage en ciment, en fines, en eau, ainsi qu'en adjuvant dont on dispose dans le but d'obtenir un béton adéquat qui vérifie les caractéristiques des BAP à l'état frais (l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à la boîte en L et la stabilité au tamis).

### Objectifs de la recherche

- Formuler un béton autoplaçant à base d'un ciment avec ajout d'argile cuite broyée; on varie les taux de cette dernière (0, 5, 10, 15 et 20 % d'ACB) et on respecte en premier lieu les caractéristiques de béton autoplaçant à l'état frais (consistance, ségrégation dynamique et statique) selon l'association française de génie civil (AFGC); en deuxième lieu les caractéristiques de BAP à l'état durci.
- Pour des raisons économiques et environnementales, on substitue une partie du ciment par des matières disponibles localement : l'argile cuite broyée (ACB) comme substitutif minérale actif à différents taux (0, 5, 10, 15 et 20 %). Le filler calcaire comme addition inerte passive pour formuler les bétons autoplaçants.
- Déterminer le taux d'ACB adéquat qui donne une bonne résistance à la compression et un retrait libre (dessiccation) minime.

### Organisation du mémoire

Le mémoire s'articule en deux grandes parties :

La partie théorique qui est une recherche bibliographique, elle contient des généralités sur les bétons et les propriétés des bétons autoplaçants.

La partie expérimentale qui se décompose en trois parties : la première, concerne la caractérisation de tous les matériaux utilisés et donne aussi leurs propriétés chimiques, physiques et mécaniques. La seconde (formulations et procédures), fait objet d'effectuer des essais préliminaires à fin d'aboutir à la bonne formulation de bétons autoplaçants, elle contient aussi l'étude des caractéristiques des BAP à l'état frais ainsi qu'à l'état durci et récolte leurs différents résultats. La troisième partie, concerne la discussion et l'interprétation des résultats.

En fin on termine par une conclusion générale et des perspectives.

## I.1. INTRODUCTION

Le matériau béton a connu plus d'un siècle de développement et d'emploi. Du béton traditionnel à quatre constituants (ciment, eau, sable et gravillon), on en est venu à formuler des bétons complexes dont les constituants sont aujourd'hui de taille et de nature très variables, grâce aux progrès dans la formulation. Depuis les années 80, on note l'apparition de nouveaux bétons, destinés à satisfaire des besoins divers: le bétonnage sans vibration (avec les bétons autoplaçants, voire les bétons autonivelants) ; de hautes résistances en compression (bétons à hautes ou très hautes performances), en traction (bétons de fibres métalliques et bétons fibrés ultra-performants)... Rien ne permet de prédire la fin de cette liste, car des bétons de caractères particuliers font toujours l'objet de recherches.

L'évolution des bétons a été notamment permise par des progrès considérables dans l'industrie des constituants. L'utilisation des adjuvants, des additions minérales, des ciments de qualité contrôlée, permet d'optimiser la composition du béton et de résoudre les problèmes de conflits au niveau de ses propriétés : consistance et résistance mécanique, résistance au jeune âge et diminution du retrait, durabilité et résistance au feu etc.

Cependant, de nombreuses recherches ont montré que, pour de tels mélanges, une variation, même faible, dans la composition peut engendrer des variations importantes des performances prévues. C'est pourquoi fabriquer ces formules est en général plus difficile que pour les bétons ordinaires [39].

## I.2. CONSTITUANTS DU BETON

Le béton est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime de ciment, de granulats (sable et gravier), d'eau, parfois d'ajouts minéraux et de faibles quantités d'adjuvants.

### I.2.1. Ciment

Le ciment est un liant hydraulique constitué de poudre minérale. Il réagit avec l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. Les réactions d'hydratation du ciment conduisent à la formation d'une pâte durcissant progressivement à l'air ou dans l'eau [28].

Le ciment est la partie « noble » du béton, c'est son développement qui a rendu possible la construction en béton. Il constitue aussi, dans la plupart des bétons, le poste le plus coûteux. Son rôle est en fait celui d'une « colle à cailloux » [22].

La normalisation européenne retient cinq catégories de ciments utilisables dans des bétons de structure [22]:

**1) Les ciments Portland purs (CPA – CEM I)**, qui contiennent au moins 95 % de clinker. Le pourcentage restant est appelé constituant secondaire.

**2) Les ciments Portland composés (CPJ – CEM II/A ou B)**, dont la teneur en addition minérale est de 6 à 20 % pour la sous-catégorie A, et de 21 à 35 % pour la sous-catégorie B.

**3) Les ciments de haut-fourneau (CHF – CEM III/A, B ou C)** dont la teneur en laitier respective est comprise dans les intervalles suivants: [36, 65 %], [66, 80 %], [81, 95 %].

**4) Les ciments pouzzolaniques (CPZ – CEM IV/A ou B)**, qui contiennent des pouzzolanes à hauteur de 10 à 35 % pour la catégorie A, et 36 à 55 % pour la catégorie B.

**5) Les ciments au laitier et aux cendres (CLC – CEM V/A ou B)**, comprenant un mélange des deux types d'additions dans des proportions de 18 à 30 %, ou de 31 à 50 %, respectivement.

Ces différents ciments sont caractérisés par les différents éléments qui entrent dans leur composition. Des abréviations sont utilisées pour décrire la chimie des ciments [49] :

- $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Alumine) → A
- CaO (Chaux) → C
- $\text{CO}_2$  (Dioxyde de Carbone) →  $\overline{\text{C}}$
- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Oxyde de fer) → F
- $\text{H}_2\text{O}$  (Eau) → H
- (Silicates de Calcium Hydratés) → C-S-H
- $\text{SiO}_2$  (Silice) → S
- $\text{SO}_3$  (Trioxyde de soufre) →  $\overline{\text{S}}$

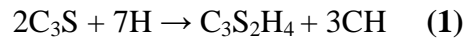
### Le clinker (K)

Le clinker, commun à tous les ciments courants, est un mélange de 80% de calcaire (calcaire, craie) et de 20% d'argile (silice – alumine – oxydes de fer) cuit et broyé [49].



Le clinker est composé de 4 phases cristallines principales [49] :

- **C<sub>3</sub>S ou l'alite** : silicate tricalcique de composition chimique  $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$  qui donne de la résistance mécanique au matériau au jeune âge. L'alite constitue entre 60% et 65% du clinker. L'hydratation du silicate tricalcique est une réaction exothermique conduisant à la formation de silicate de calcium hydraté et d'hydroxyde de calcium. Elle se résume par l'équation (1) :



A l'inverse de la composition de l'hydroxyde de calcium (CH ou Portlandite) qui est un composé cristallin bien défini, la composition des silicates de calcium n'est pas bien définie et est généralement notée CSH.

L'alite est le principal composé du clinker et les hydrates formés lors de sa réaction avec l'eau de gâchage sont à la fois impliqués dans la résistance à court et moyen termes du matériau.

- **C<sub>2</sub>S ou la bélite** : silicate bicalcique de composition chimique  $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$  qui permet au matériau d'atteindre des résistances mécaniques plus importantes à moyen et long termes. La bélite constitue entre 5% et 20% du clinker.

L'hydratation du silicate bicalcique est également une réaction exothermique qui conduit à la formation de silicate de calcium hydraté et d'hydroxyde de calcium. Elle se résume par l'équation (2) :

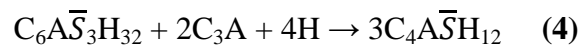


La formation des hydrates est beaucoup plus lente que celle issue de la réaction de l'alite avec l'eau de gâchage, ces hydrates permettent d'assurer la résistance à long terme.

- **C<sub>3</sub>A ou la célite** : aluminat tricalcique de composition chimique  $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$  qui participe principalement au phénomène de prise des bétons mais qui ne présente que de faibles résistances mécaniques et chimiques. La célite constitue entre 4% et 12% du clinker. Le processus d'hydratation de l'aluminat tricalcique se déroule en deux temps. Tout d'abord, en présence de sulfate, l'hydratation de C<sub>3</sub>A engendre la formation d'ettringite, l'équation (3) :



Ensuite, quand la teneur en sulfate diminue, l'ettringite réagit avec le reste de célite pour former du monosulfo-aluminat hydraté, l'équation (4) :



De part sa forte réactivité avec l'eau de gâchage, la célite a un rôle majeur dans la rhéologie de la pâte et la résistance à court terme du matériau.

- **C<sub>4</sub>AF ou la ferrite** : alumino-ferrite tétracalcique de composition chimique  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ . Le C<sub>4</sub>AF constitue entre 1% et 5% du clinker.

### I.2.2. Granulats

Les granulats sont des matériaux d'origine minérale qui entrent dans la composition des bétons et mortiers. Les granulats font l'objet de la norme XP P18-545 [49].

Les granulats sont répertoriés selon leurs tailles, on définit [49] :

- les fillers ou fines (diamètre  $D < 2$  mm et  $70\% < 0,063$  mm),
- les sablons qui constituent les granulats les plus fins ( $D < 1$  mm et  $70\% < 0,063$  mm),
- les sables ( $1$  mm  $< D < 6,3$  mm),
- les gravillons qui constituent les granulats les plus gros ( $1$  mm  $< D < 125$  mm).

Avec ; D: dimension supérieure du granulat.

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine soit : naturelle, artificielle ou recyclée.

• **Granulats naturels** : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique.

-Les **granulats de roche meuble**, dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion.

-Les **granulats de roche massive** sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes anguleuses.

• **Granulats artificiels** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.

• **Granulats recyclés** : obtenus par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

### I.2.3. Eau de gâchage

L'eau joue un double rôle dans la technologie du béton. D'une part, elle permet l'hydratation du ciment et d'autre part, elle est indispensable pour assurer l'ouvrabilité et un bon compactage du béton [29].

L'eau courante peut être utilisée pour le gâchage, pour autant qu'elle ne contienne pas en quantités appréciables des substances susceptibles de réagir avec le béton.

Ces substances peuvent induire en particulier [29] :

- une accélération ou un ralentissement de la prise et du durcissement (sucre, acides humiques)
- un entraînement excessif d'air non contrôlé, d'où perte de résistance (micro-organismes, huiles, graisses, ...)
- la corrosion des armatures.

La norme NF EN 1008 de juillet 2003 admet comme principe que l'eau potable peut être utilisée sans contrôle particulier pour la confection du béton.

L'eau destinée au gâchage doit être claire, incolore et inodore. Après agitation, il ne doit pas se former de mousse persistante. L'aptitude à l'emploi de l'eau pour la production de béton dépend de son origine (norme NF EN 1008) [29].

-La teneur en sulfate ne doit pas dépasser 2000 mg/l [29].

-La teneur en chlorures ne doit pas dépasser [29] :

- pour le béton armé : 1000 mg/l,
- pour le béton non armé : 4500 mg/l,
- pour le béton précontraint : 500 mg/l.

-La teneur en sels alcalins doit rester faible dans les bétons et les mortiers. Les impuretés organiques doivent être négligeables.

### I.2.4. Adjuvants

Les adjuvants sont des produits dosés en faible quantité dans les bétons : moins de 5 % de la masse de ciment. Ce sont souvent des composés organiques, spécialement formulés pour les

applications béton, et disponibles commercialement sous forme de solutions aqueuses. Ils ont pour but d'améliorer certaines propriétés du matériau [22], voir le tableau 1.

**Tableau 1. Classification des adjuvants [29].**

Adjuvants	Effets principaux
<b>Plastifiants</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Diminution du rapport E/C et/ou amélioration d'ouvrabilité.</li> <li>-Augmentation des résistances mécaniques.</li> <li>-Défloculation des grains de ciment.</li> </ul>
<b>Superplastifiants (ou « fluidifiants »)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Forte réduction du rapport E/C et/ou fort allongement des temps d'ouvrabilité.</li> <li>-Forte augmentation des résistances mécaniques.</li> <li>-Défloculation des grains de ciment.</li> <li>-Fluidification des bétons.</li> </ul>
<b>Accélérateurs de prise ou de durcissement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Utilisation hivernale des bétons.</li> <li>-Accroissement de la vitesse de montée en résistance des bétons.</li> <li>-Réduction des temps de prise des bétons.</li> </ul>
<b>Retardateurs de prise</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Utilisation des bétons en été.</li> <li>-Accroissement des temps d'ouvrabilité et des temps de prise.</li> <li>-Régulation de la chaleur d'hydratation.</li> </ul>
<b>Entraîneurs d'air</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Protection des bétons contre les actions du gel et des sels de déverglaçage par création d'un réseau de micro bulle d'air.</li> </ul>
<b>Hydrofuges</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Réduction de la capillarité et de l'absorption capillaire des bétons.</li> <li>-Renforcement de l'étanchéité des bétons.</li> <li>-Possibilité de réduire certaines efflorescences.</li> </ul>

### I.2.5. Additions minérales

Un béton doit contenir un certain volume de fines, pour assurer sa stabilité à l'état frais. Lorsque ce volume est occupé intégralement par du ciment Portland, il fournit au matériau durci un niveau de performance excessif par rapport aux spécifications, il est naturel de l'occuper en partie avec des matériaux fins, moins réactifs que le clinker mais d'un coût inférieur, notamment sur les plans énergétiques et environnementaux. Ces additions minérales peuvent être mélangées au ciment lors de sa fabrication (ciments composés) ou ajoutées directement dans le malaxeur à béton [22].

On distingue plusieurs types d'additions (inertes, actives et autres), à savoir :

#### I.2.5.1. Ajouts minéraux inertes [35]

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60  $\mu\text{m}$  ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (NF P 18-305)

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats, à savoir :

#### A. Fillers [35]

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte...). Les fillers se différencient les uns des autres par :

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qui'ils contiennent.
- Leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- Leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un CPA peuvent jouer plusieurs rôles:

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du  $C_3S$  et du  $C_3A$  et à la formation de carboaluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.

## B. Poussière

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000  $cm^2/g$ . Le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout [35].

### I.2.5.2. Ajouts minéraux actifs

On distingue deux types (ajouts à hydraulicité latente et ajouts pouzzolaniques) à savoir :

#### A. Ajouts à hydraulicité latente

En présence d'eau et en milieu alcalin suite à la libération de la chaux lors de l'hydratation du clinker, les ajouts à hydraulicité latente réagissent en formant des composés semblables aux hydrates de clinker, en durcissant de manière plus lente que le ciment type CEM I [29].

#### A.1. Laitiers de haut fourneau

Les laitiers sont des sous-produits de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Ce sont des silico-aluminates de chaux traités de différentes façons à la sortie du haut fourneau :

- Par refroidissement brusque dans l'eau ou dans l'air : ceci empêche la cristallisation et permet son utilisation dans les ciments et les bétons comme pouzzolane,

- Par refroidissement lent à l'air : ceci donne un matériau cristallisé sans aucun pouvoir liant qui est utilisé comme granulats pour les travaux routiers et dans les bétons [2].

## **B. Ajouts pouzzolaniques**

Les ajouts pouzzolaniques peuvent être naturels comme les pouzzolanes, ou artificiels comme les cendres volantes et la fumée de silice.

Dans une première phase de l'hydratation, ces ajouts sont inactifs et retardent plus ou moins la montée en résistance du béton. Dans une deuxième phase, ils réagissent lentement avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés insolubles, analogues aux hydrates de ciment [29].

### **B.1. Cendres volantes**

Les cendres volantes utilisées dans les ciments et les bétons sont produites dans les centrales thermiques utilisant du charbon pulvérisé. Elles se présentent sous forme d'une poudre de couleur plus ou moins foncée suivant sa teneur en carbone et en impureté. Les cendres volantes sont sous forme de particules sphériques vitreuses, pleines ou creuses. La granulométrie s'échelonne de 1 à 200  $\mu\text{m}$  et, en général, 50% des particules ont un diamètre inférieur à 30  $\mu\text{m}$ . Leur surface spécifique Blaine varie entre 250 et 400  $\text{m}^2/\text{kg}$  (domaine analogue à celui des ciments) [2].

### **B.2. Fumée de silice**

Se sont des sous produits de la fabrication du silicium ou de ferrosilicium. Ils se présentent sous forme de microsphères de silice ayant des diamètres moyens de 0,1  $\mu\text{m}$ . La surface spécifique varie de 20 à 25  $\text{m}^2/\text{g}$ . Les fumées de silice se caractérisent par une structure vitreuse (produit très réactif) avec une haute teneur en silice (de 75 à 95%).

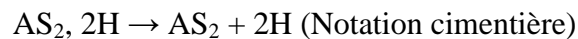
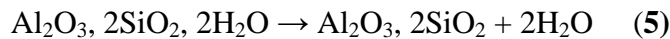
Les fumées de silice agissent de trois façons dans les bétons : action physique, physicochimique et pouzzolanique [2], [41].

### **B.3. Autres additions**

On emploie dans certaines parties du monde d'autres additions minérales, en particulier des additions pouzzolaniques comme les cendres de paille de riz et les métakaolins. Ces produits ne sont pas normalisés en Europe [22].

**B.3.1. Métakaolin (MK) [17]**

Le métakaolin (MK) est une addition minérale (classée ultrafine) possédant des propriétés pouzzolaniques. Cette pouzzolane est obtenue par la calcination d'argile, la kaolinite, dont la pureté en kaolin est importante. Après l'évaporation de l'eau adsorbée entre les feuillets d'argile ( $T > 100^{\circ}\text{C}$ ), la phase de déshydroxylation (perte des groupements hydroxyles liés physiquement aux feuillets d'argile qui se produit entre  $700$  et  $800^{\circ}\text{C}$ ) entraîne une destruction de la structure cristalline du kaolin qui ne recristallise pas. Le traitement thermique entraîne donc le passage d'une phase cristallisée et ordonnée (kaolinite) en une phase désordonnée (métakaolinite) par un effondrement du réseau cristallin. La transformation du kaolin par calcination au métakaolin s'effectue selon l'équation (5)



L'objectif de la calcination est de rendre pouzzolanique des matériaux peu réactifs par déshydroxylation.

Deux types de calcination sont employés industriellement pour obtenir le MK.

**- Calcination lente dite à lit fixe**

Dans la calcination lente industrielle, la déshydroxylation est complète après avoir été menée lentement à une température suffisamment haute (entre  $600^{\circ}\text{C}$  et  $800^{\circ}\text{C}$ ) pendant une durée suffisamment longue (5 heures de cuisson). Pour la calcination lente, le cru est préalablement calciné puis broyé très finement ( $D_{\text{max}} = 20\mu\text{m}$ ), ce qui nécessite plus d'énergie [15], [47].

**- Calcination « flash »**

La calcination « flash » est une calcination très rapide d'un solide, généralement sous forme fine ( $D_{\text{max}} = 80\mu\text{m}$ ) en suspension dans un gaz. Le chauffage et le refroidissement sont de l'ordre de quelques dixièmes de secondes. Bien que la plupart des transformations chimiques et physiques aient une cinétique rapide à haute température, le temps très court de résidence dans le four mène à des transformations qui peuvent partiellement ne pas être achevées. Les changements sont cinétiquement arrêtés et la déshydroxylation peut être incomplète si le temps d'exposition est trop court [21], [32] et [52].



**Remarque** : Une surchauffe de la kaolinite engendre de la mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2$ ) indésirable en raison d'une absence de réactivité vis-à-vis de l'hydroxyde de calcium.

### B.3.1.1. Réaction pouzzolanique en présence de MK [17]

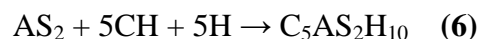
On appelle matériau pouzzolanique un matériau qui réagit avec l'hydroxyde de calcium pour néoformer des hydrates de type siliceux ou silico alumineux possédant des propriétés liantes. L'hydroxyde de calcium peut provenir de la présence de chaux hydratée ou de l'hydratation du ciment portland. La pouzzolanité d'un matériau peut être évaluée selon le test «Chapelle», mesurant la quantité consommée d'hydroxyde de calcium.

**Tableau 2. Réactivité pouzzolanique (mg de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  / g de matériau) [3].**

Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Bauxite calcinée	Cendres volantes	Métakaolin
300	427	534	875	<b>1000</b>

Selon le tableau 2, le métakaolin s'avère donc une addition très intéressante au vu de sa haute réactivité pouzzolanique.

Mélangé au ciment, le métakaolin (MK) possède un très bon effet pouzzolanique. La réaction pouzzolanique se produit en solution (dissolution / précipitation) entre la silice et l'alumine provenant de la dissolution du MK, et l'hydroxyde de calcium CH issu de l'hydratation du ciment (*Cabrera [16], Rojas [48]*). Cette réaction donne des C-S-H qui précipitent (*Sabir [50]*) et des aluminates de calcium hydratés. La réaction pouzzolanique est donnée par l'équation (6) :



### B.3.1.2. Intérêt de l'incorporation de MK dans la matrice cimentaire [17]

Du point de vue microstructural, l'incorporation de MK va influencer les propriétés de diverses manières. L'ajout de MK va entraîner :

- l'augmentation de la compacité de la matrice à cause de la modification de la granulométrie, de la forme des grains et du degré d'agglomération (*Gaboriau [25]*).

- la modification de la porosité d'ensemble (*Bready [12], Khatib [36]*) et de la distribution porosimétrique (taille des pores) (*Kostuch [38], Bandoiannis [5]*) relative à la modification de l'empilement granulaire, de la porosité intrinsèque du MK et du taux d'avancement de la réaction pouzzolanique.

Les caractéristiques du MK laissent penser que lors de son incorporation dans un matériau cimentaire, ses propriétés risquent d'être affectées à l'état frais (rhéologie) ainsi qu'à l'état durci (performance mécanique, durabilité...).

#### **B.3.1.3. Caractéristiques des MK à l'état frais [17]**

Le souci majeur du MK réside dans sa demande en eau importante car cette addition possède une structure complexe et une surface spécifique importante (*Gaboriau [25]*). Pour maintenir une fluidité constante, deux solutions sont envisagées :

- soit on augmente la quantité d'eau (*Courard [20]*), ce qui entraîne une diminution des performances à l'état durci (résistance et durabilité),
- soit le mélange est adjuvanté avec un superplastifiant haut réducteur d'eau ce qui est préconisé en général et qui permet de maintenir de bonnes performances (*Vu [60]*).

De plus, (*Moulin [43]*), confirme que le MK augmente significativement la thixotropie du mélange entre 5 et 90 minutes, comparativement à un mélange contenant uniquement du ciment. Ce dernier point peut s'avérer avantageux pour faciliter le démoulage immédiat.

#### **B.3.1.4. Caractéristiques des MK à l'état durci [17]**

##### **-Performances mécaniques en compression**

(*Khatib [36]*), montre que le MK augmente la résistance mécanique en compression. A long terme, cette augmentation est d'autant plus visible que la réaction pouzzolanique s'est développée dans le temps et a conduit à une densification de la matrice. La substitution du ciment par du MK semble posséder un optimum situé entre 10 et 30 % en masse selon les auteurs (*Khatib [36], Sabir [50]*). En effet, le grand nombre de modifications successives de la microstructure incorporant du MK, montre qu'il existe différentes valeurs optimales de substitution selon l'âge du matériau (tableau 3).

Tableau 3. Substitutions optimales selon l'âge du matériau (Vu [60]).

Age du matériau j (en jours)	$3 < j < 7$	$7 < j < 28$	$j > 28$
Taux de substitution optimal de ciment par du MK (en masse)	10%	15 à 20%	20 à 25%

Dans les travaux de Khatib et al (1996), l'augmentation des résistances obtenue lorsqu'une partie du ciment est remplacée par du métakaolin est plus importante pour les mortiers. La Figure 1 présente l'évolution en fonction du temps de la résistance relative qui correspond au rapport de la résistance du mortier à base de métakaolin sur la résistance du mortier témoin au même âge. Le maximum de résistance relative est obtenu à 14 jours ce qui correspond, dans ce cas, au maximum de la réaction pouzzolanique du métakaolin [56].

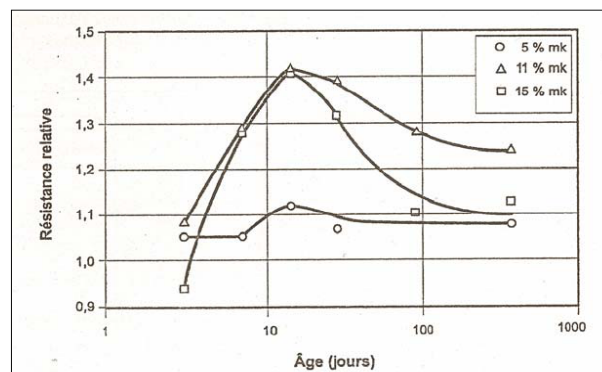
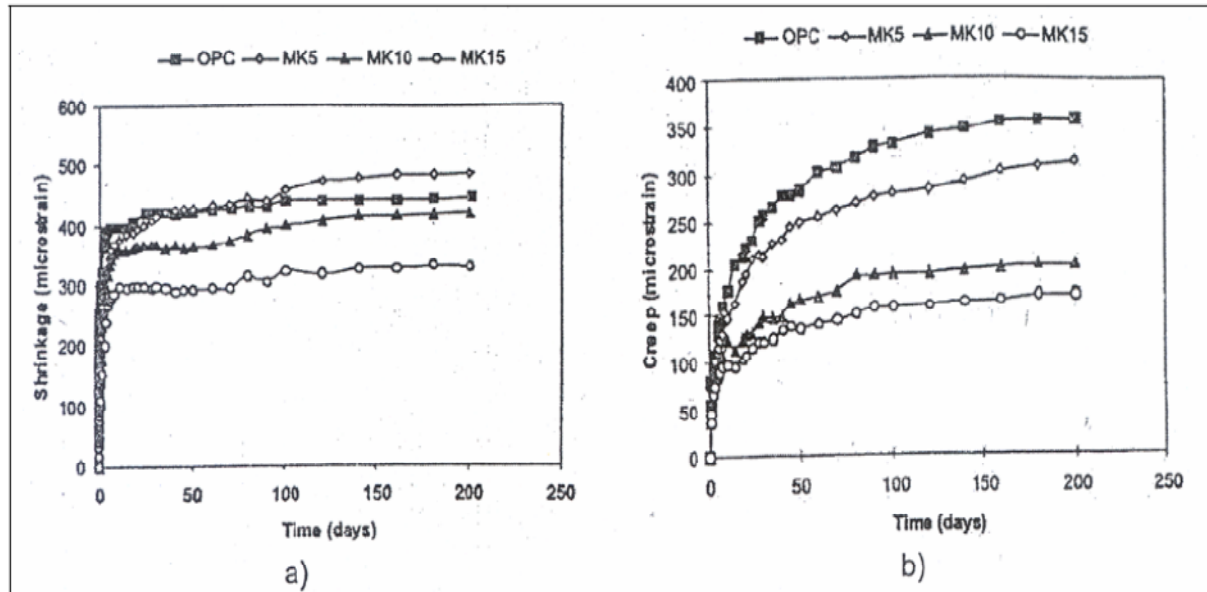


Figure 1. Résistance relative d'un mortier incorporant du métakaolin [56].

#### -Déformations différées (Brooks [14])

Pour les déformations de retrait, l'incorporation de MK est aussi favorable. Dans un premier temps, cette substitution peut diminuer partiellement le retrait endogène au jeune âge mais cela dépend du taux de substitution. De même, le retrait total est d'autant plus diminué que le taux de substitution en MK est important. Finalement, le retrait de dessiccation est fortement diminué par la présence de MK dans la matrice cimentaire (Brooks [14], Gleyze [27]).

Concernant le fluage, l'incorporation de MK est bénéfique diminuant d'une part le fluage total mais aussi le fluage endogène (Brooks [14]).



**Figure 2. Influence de la teneur en Métakaolin sur le retrait endogène (a) et le fluage (b) (taux de chargement 20 % de la résistance à 28 jours), (OPC : Ordinary Portland Cement) [56].**

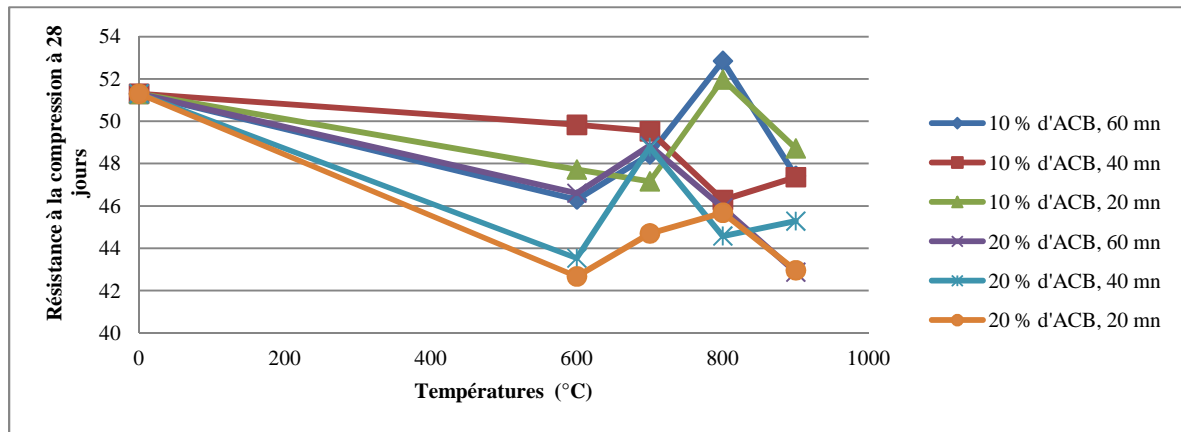
### B.3.2. Argile calcinée ou argile cuite broyée (ACB)

Pour ce qui est de notre cas, la méthode de calcination de l'argile diffère des deux méthodes citée auparavant pour les métakaolins, elle est tout à fait autre :

L'argile crue broyée et tamisée sous le tamis de 63  $\mu\text{m}$  est ensuite cuite dans un moule en fente sous couvercle introduit dans un four électrique pendant une heure à une température de 750°C d'après [18]. L'épaisseur de l'argile dans le moule est de 5 cm. Une fois cuite il a été remarqué la formation de particules agglomérées ce qui a nécessité un nouveau passage au tamis de 63  $\mu\text{m}$ .

#### B.3.2.1. Résistance à la compression des mortiers à 28 jours

D'après les travaux du rapport de recherche [18], la figure 3 illustre les résultats des résistances à la compression des prismes de mortiers de dimension (4×4×16 cm<sup>3</sup>).

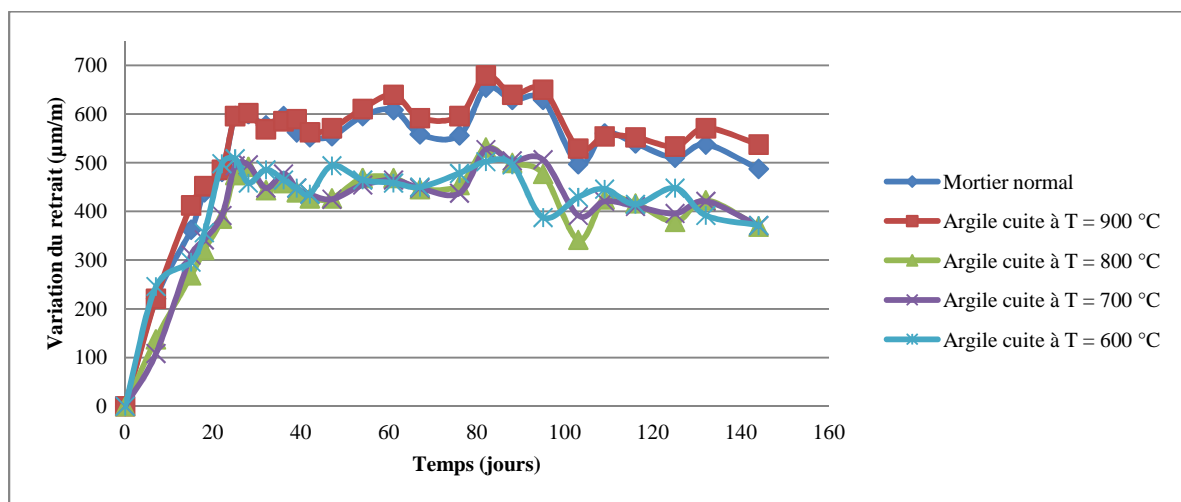


**Figure 3. Comparaison entre les résistances à la compression à 28 jours obtenues avec 10% et 20% d'ajout d'ACB en fonction des températures de cuisson de cette dernière [18].**

La figure 3 montre que les meilleures résistances à la compression à 28 jours sont obtenues pour 10% de taux d'ajout d'ACB (cuite à la température de 800 °C pendant un temps de 60 minutes) [18].

### B.3.2.2. Retrait de dessiccation des mortiers

La figure 4 ci-dessous, montre la variation du retrait des mortiers en fonction du temps. Les mortiers étudiés ont les caractéristiques suivantes : 10 % d'ACB à différentes températures de cuisson de l'argile pendant un temps de 60 minutes [18].



**Figure 4. Variation du retrait de dessiccation des différents mortiers pour un temps de cuisson de 60 minutes [18].**

D'après la figure 4, le retrait des mortiers avec l'argile cuite à 600, 700 et 800 °C a diminué par rapport au retrait normal de référence (sans ajout d'ACB) [18].

### Remarque

D'après les figures 3 et 4 et en se basant sur les deux critères essentiels des mortiers à l'état durci, à savoir : la résistance à la compression élevée et un retrait minime ; il a été conclu que : - le taux d'ajout d'ACB est 10 %.

- le temps de cuisson de l'argile est 60 minutes.
- la température de cuisson de l'argile varie de 700 et 800 °C.

### I.3. CONCLUSION

L'utilisation des ajouts minéraux a pour but d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. L'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons apporte des avantages techniques considérables. Ils : affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments [35].

L'introduction de matériaux à propriétés pouzzolaniques comme le métakaolin, en remplacement d'un pourcentage du ciment Portland dans les mortiers et bétons peut être envisagée car ces pouzzolanes sont utilisées pour réagir avec la portlandite issue de l'hydratation du ciment pour produire des hydrates de nature proche de ceux du ciment [56].

**Le taux d'ajout qui semble donner d'assez bons résultats à l'essai de résistance à la compression sur des mortiers est 10 % [18].**

**Pour ce qui est de la durée et de la température de cuisson de l'ACB, les meilleurs résultats ont été obtenus pour 60 minutes de durée de cuisson à une température comprise entre 700 et 800°C, ce qui nous pousse à adopter la température de (750°C) [18] pour notre projet.**

**Notre travail expérimental porte sur l'exploitation de l'argile cuite broyée (comme substitutif d'une partie de ciment à différents taux : (0, 5, 10, 15 et 20 %)) dans la production des bétons autoplaçants.**

## II.1. INTRODUCTION

Les bétons autoplaçants (BAP) sont encore à l'heure actuelle qualifiés de « nouveaux bétons » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement.

Bien que les connaissances sur les BAP soient suffisantes pour permettre leur utilisation, certains aspects restent à améliorer. En effet, leur composition spécifique nécessite la mise en place d'un contrôle soutenu de leur formulation, ainsi qu'un contrôle de leurs propriétés à l'état frais, avant mise en œuvre. La maîtrise de ces matériaux n'est pas encore acquise, en témoigne la diversité des études menées afin d'appréhender le comportement des BAP [9].

Le problème de la formulation des bétons s'est renouvelé en profondeur, principalement du fait de l'utilisation croissante et souvent conjointe des superplastifiants et des agents colloïdaux d'une part et des additions minérales d'autre part [31].

## II.2. DEFINITION

Les bétons autoplaçants (BAP, ou SCC, en anglais, pour self-compacting concrete) ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 80 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores [4].

Ces bétons sont très fluides et se mettent en œuvre sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans des coffrages complexes et très encombrés, tout en donnant un produit final homogène [31].

Les BAP sont déclinés en deux familles d'applications. La première emploie le terme "béton autoplaçant", ou BAP, pour désigner les bétons destinés aux applications verticales et éléments massifs (voiles, poutres, piles, etc.) La seconde désigne sous l'appellation "béton autonivellant", ou BAN, les bétons destinés aux applications horizontales (dalles) [58].

## II.3. COMPOSITION D'UN BAP ET SA PARTICULARITE

Le béton autoplaçant (BAP) est un mélange de liant, de sable, de gravier, d'un agent de viscosité, de superplastifiant et d'eau. On peut obtenir une infinité de bétons, en faisant varier les proportions de ces constituants, certains seront mauvais, d'autres seront acceptables, d'autres enfin (les moins nombreux) seront bons [31].

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre à savoir [4] :

### II.3.1. Un volume de pâte élevé

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400l/m<sup>3</sup>) [4].

### II.3.2. Une quantité de fines ( $\emptyset < 80 \mu\text{m}$ ) importante

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m<sup>3</sup>) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (et un coût de formule trop élevé).

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (DTU 21, normes XP P 18-305 ou EN 206) et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc., le filler calcaire étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les formulations de BAP) et leur proportion respective.

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton (figure 5) [4].

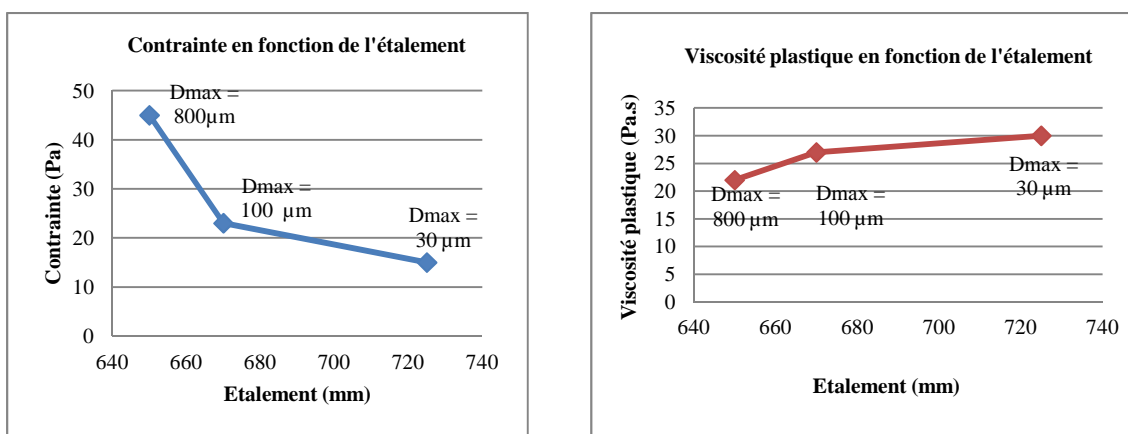


Figure 5. Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [4].



### II.3.3. L'emploi de superplastifiants

La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylate, polyacrylate ou polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (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 la ségrégation et du ressuage. Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau (figure 6). Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante [4].

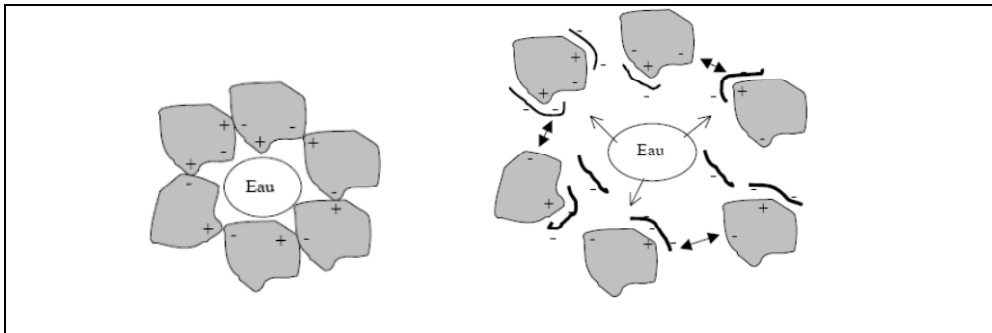


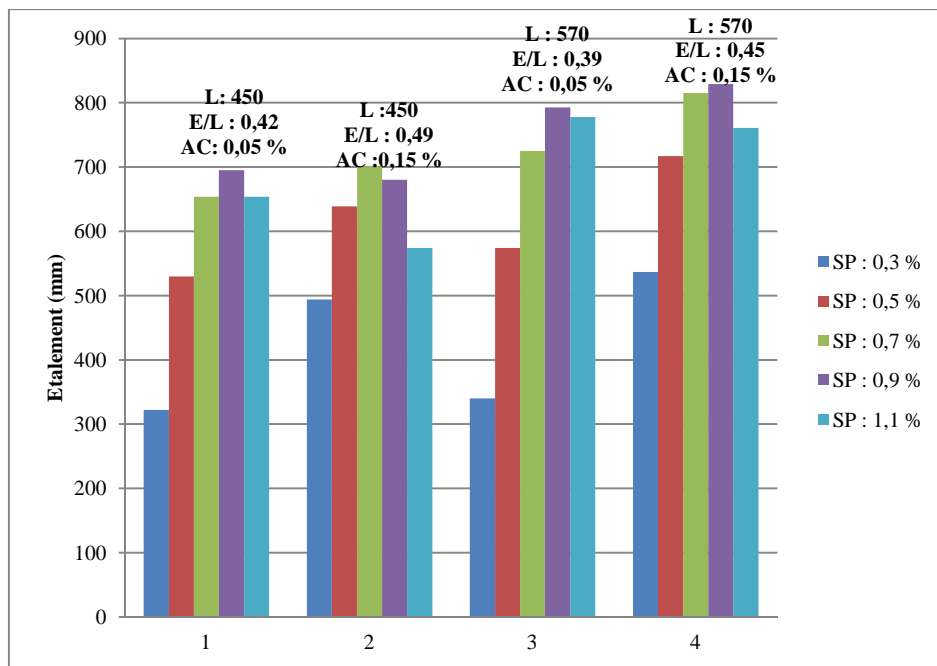
Figure 6. Action des superplastifiants-Défloculation des grains de ciment [9].

### II.3.4. L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau)

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité - superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage [4].

A. Ghezal [26] a utilisé des BAP de  $450 \text{ kg/m}^3$  et de  $570 \text{ kg/m}^3$  de liant avec différents dosages en superplastifiant et différents dosage en agent colloïdal, et un rapport E/L qui varie entre 0,42 et 0,49. L'auteur remarque que l'étalement diminue avec l'augmentation du dosage en agent de viscosité et il a constaté que quatre facteurs principaux sont capables d'entraîner un effet très significatif : le dosage en liant, le rapport E/L, le dosage en superplastifiant et le dosage en gomme de welan. Les résultats ont donné l'histogramme présenté dans la figure 7 [8].



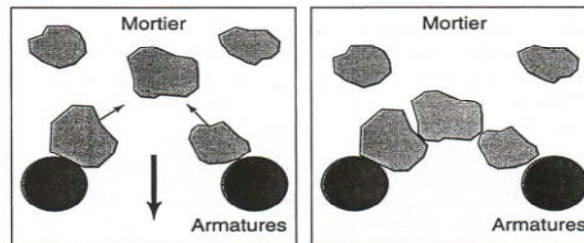
**Figure 7. Influence des Agents de viscosité et des Superplastifiants sur l'ouvrabilité des BAP [26].**

### II.3.5. Un faible volume de gravillon [4]

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Mais il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée (figure 8). Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

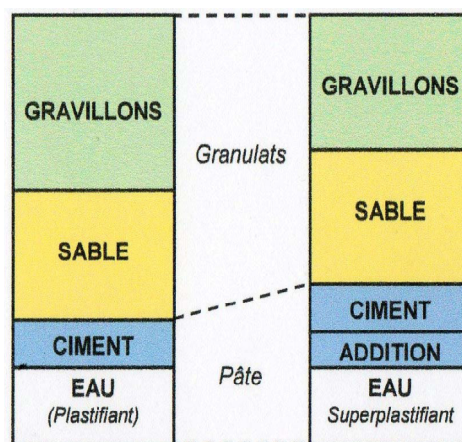
Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons ( $D_{MAX}$ ) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec  $D_{MAX}$ , cela conduit à diminuer le volume de gravillon.



**Figure 8. Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [4].**

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes (figure 9). Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires.



**Figure 9. Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré [4].**

#### II.4. L'ASPECT EMPIRIQUE DE LA FORMULATION DES BAP

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années [8].

Le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de béton prêts à l'emploi (BPE) est l'industrie du bâtiment, qui utilise principalement des bétons de 25 à 35 MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des bétons ordinaires qu'ils doivent remplacer) [58].

En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût. Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, à savoir [8] :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m<sup>3</sup>.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m<sup>3</sup>. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m<sup>3</sup>.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages.

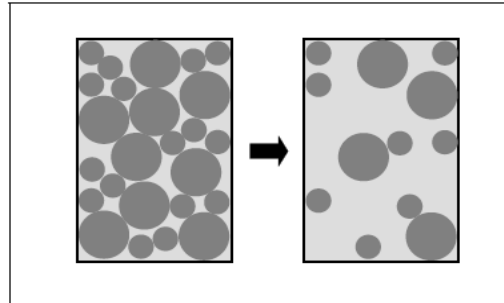
## II.5. LES APPROCHES DE FORMULATION DES BAP

Il existe dans la littérature des techniques de formulation moins empiriques. Ces méthodes sont basées sur des concepts plus ou moins différents et peuvent être présentées en cinq grandes familles d'approches. Toutes les méthodes de formulation des BAP recueillies dans la littérature sont issues d'une ou plusieurs des approches suivantes [8] :

### II.5.1. L'approche basée sur l'optimisation des Mortiers

Okamura ([45], [53] et [59]), propose de formuler les BAP en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie.

La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité [8].



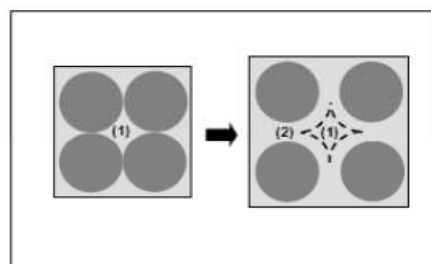
**Figure 10. Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité [58].**

A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al [58], proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons.

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications : Billberg, Jacobs et al [58], montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier.

### II.5.2. L'approche basée sur l'optimisation du volume de pâte

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide (les granulats) et une phase liquide (la pâte). Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Oh et al, introduisent la notion d'excès de pâte schématisée sur la figure 11. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage [8].



**Figure 11. Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2), [58].**

Oh et al [58], ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par Tangtermsirikul, Petters-soa et Bai [58]. Cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés ; un volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage.

### II.5.3. L'approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire [8]

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Reprenons la figure 11, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie.

Sedran et De Larrard ([53], [54] et [55]), ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet aussi de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées,...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton.

#### II.5.4. L'approche basée sur un plan d'expérience

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante pour connaître l'effet des paramètres de composition. Khayat et al [58], ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines  $E/(C+A)$ , la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC d'après [8].

#### II.5.5. L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE [8]

L'approche du Mortier de Béton Equivalent (MBE) a été initialement développée à (Guerville, France) [52], pour faciliter la sélection des adjuvants lors de la formulation d'un béton, en utilisant des tests sur mortier au lieu de tests sur béton. En fonction des essais préalables réalisés, les résultats obtenus peuvent être utilisés de façon qualitative ou quantitative. L'expérience accumulée au cours des dernières années dans de nombreuses applications industrielles a confirmé la validité de cette méthode [30]. Cependant, l'ensemble de ces exemples concernait des bétons d'ouvrabilité classique.

O. Haddad, S. Aggoun et al [30], ont mené un travail qui consistait à l'extension de la méthode MBE aux BAP, en étudiant les compositions de 5 bétons et leurs MBE. Les auteurs ont pu confirmer qu'il est possible d'étendre la méthode MBE aux BAP et la composition particulière des BAP ne change pas les principes de calcul des MBE.

L. Nachbaur et al [44], ont aussi étudié la faisabilité de l'extension de la méthode MBE au BAP. Ils ont pu montrer que la méthode MBE qui était initialement développé pour des bétons d'affaissement inférieur à 21 cm peut être adaptée aux BAP et aussi que les principes de base de la méthode peuvent être gardés.

## II.6. CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS

Les connaissances acquises depuis l'apparition des BAP et la meilleure maîtrise de toutes les étapes (formulation, fabrication, mise en œuvre et contrôle) sont suffisantes pour permettre l'utilisation de ces bétons dans de nombreuses applications. Certains points restent cependant à améliorer pour en étendre l'emploi.

Le comportement d'un BAP à l'état frais se différencie notablement de celui d'un béton ordinaire. Son ouvrabilité se décline classiquement suivant : sa mobilité en milieu non confiné, sa mobilité en milieu confiné et sa stabilité (vis à vis de la ségrégation et du ressuage). La formulation d'un tel béton est donc plus complexe que celle d'un béton traditionnel et implique une composition spécifique [9].

### II.6.1. Mobilité en milieu non confiné

La fluidité caractérise la capacité du béton à s'écouler sous son propre poids avec un débit suffisant. Elle est abordée dans cette partie pour un écoulement sans obstacle [9].

#### II.6.1.A. Essai d'étalement (Slump Flow)

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant de caractériser la mobilité en milieu non confiné est l'essai d'étalement réalisé à l'aide du cône d'Abrams.

En effet, la valeur de l'étalement, donnée par la mesure du diamètre de la galette de béton, s'avère être plus représentative que celle de l'affaissement.

Les valeurs d'étalement sont habituellement fixées entre 60 et 75 cm, sans auréole de laitance ou d'amoncellement de gros granulats au centre en fin d'essai. La vitesse d'étalement du béton est également une indication souvent prise en compte ( $t_{50}$  par exemple : temps pour atteindre une galette de diamètre 50 cm) [4].

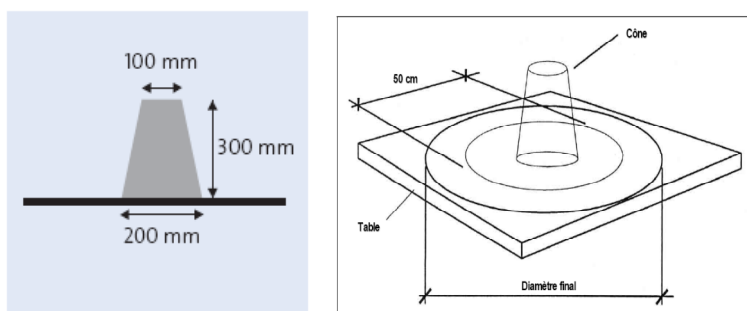


Figure 12. Essai d'étalement au cône (slump flow) [4].



### II.6.1.B. Essai d'entonnoir (V-Funnel)

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante : l'entonnoir dont les dimensions sont définies à la figure 13 est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant.

Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le béton autoplaçant [29].

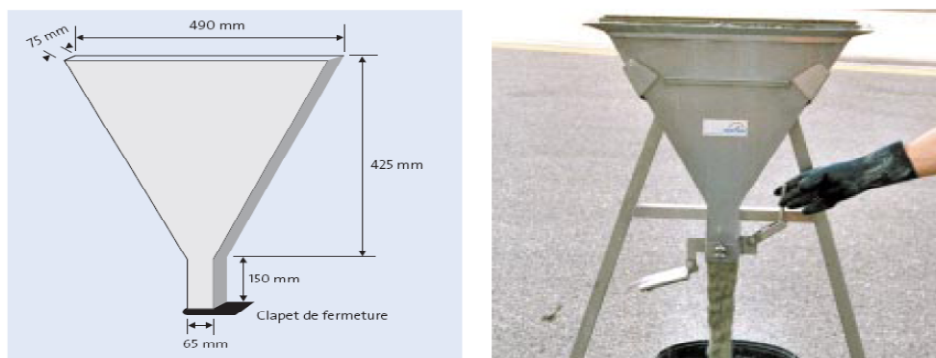


Figure 13. Essai d'entonnoir utilisé pour mesurer le temps d'écoulement du béton [29].

### II.6.2. Mobilité en milieu confiné

Pour caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique, aucun essai de référence n'a encore fait l'unanimité, mais tous ont pour objectif d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent permettre de déceler des problèmes de blocage (par formation de voûtes des granulats) lors de l'écoulement.

#### II.6.2.A. Essai de boîte en L (L-Box)

L'essai de la boîte en L fait partie de ces essais. La partie verticale du L est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (41 mm entre 3 barres Ø12) qui correspond à des ouvrages très ferrailés mais qui peut être éventuellement allégé (59 mm d'espace libre entre 2 barres).

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs  $H_2/H_1$ , voir figure 14) doit être supérieur à 0.8. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton [1].

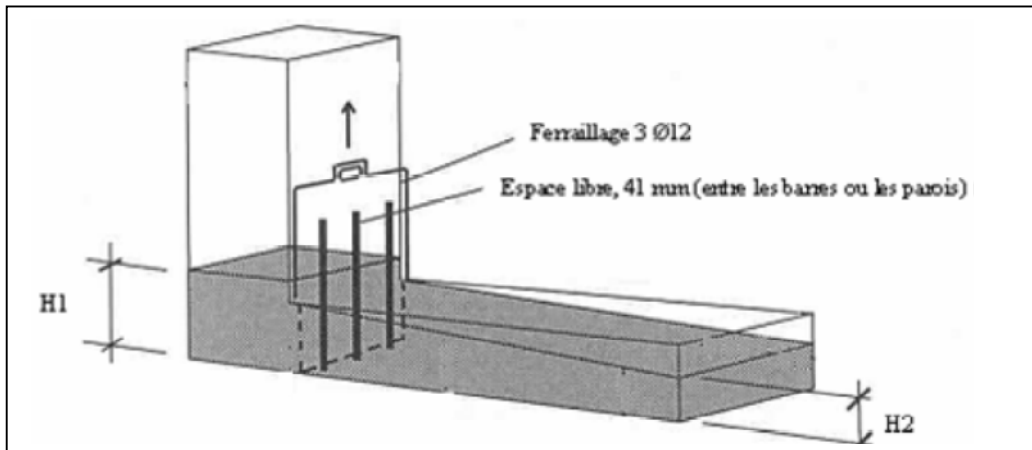


Figure 14. Essai de la boîte en L (L-box test) [1].

### II.6.2.B. Essai d'étalement modifié (J-Ring)

L'essai d'étalement modifié (J-Ring) fut développé au Japon et consiste à faire s'écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature  $\text{Ø}16$  à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton autoplaçant satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats parait homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau [29].

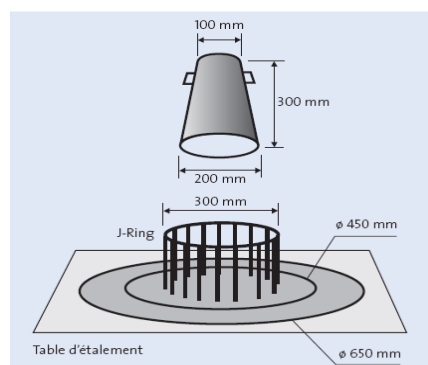


Figure 15. Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring) [29].

### II.6.3. Stabilité

L'aptitude d'un BAP à rester homogène une fois coulé est aussi importante que celle durant la mise en place. L'homogénéité du matériau conditionne en effet ses propriétés à l'état durci (résistance mécanique, retrait, durabilité, etc.). Le béton doit donc être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée [4].

#### II.6.3.A. Résistance à la ségrégation

L'essai de stabilité de référence n'existe pas encore mais la résistance à la ségrégation statique d'un BAP doit impérativement être caractérisée. Différents tests peuvent être utilisés pour caractériser cette capacité d'un BAP à rester homogène après sa mise en place jusqu'au début de prise.

Un de ces essais est celui dit de « stabilité au tamis » (voir la figure 16), il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (noté  $P_{\text{LAITANCE}}$ ) d'un échantillon de béton ( $4,8 \pm 0,2$  kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes [4] :

- $0\% < P_{\text{LAITANCE}} < 15\%$  : stabilité satisfaisante,
- $15\% < P_{\text{LAITANCE}} < 30\%$  : stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser sur site),
- $P_{\text{LAITANCE}} > 30\%$  : stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).

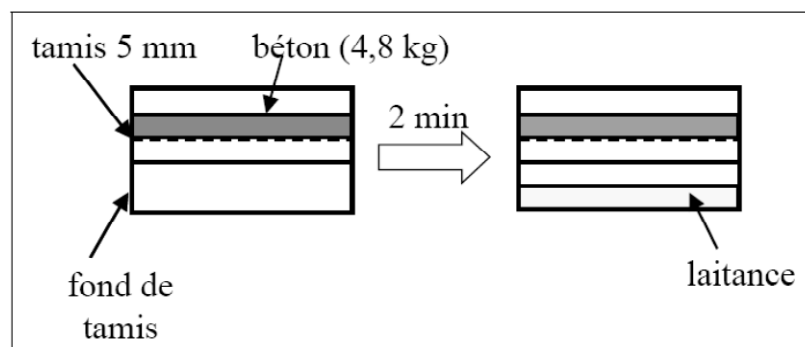
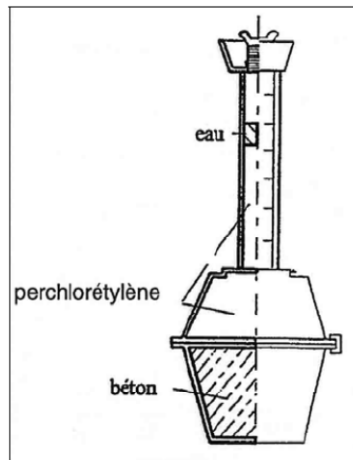


Figure 16. Essai de stabilité au tamis [4].

#### II.6.3.B. Ressuage

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées (LCPC), figure 17) : le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure

à celle de l'eau : 1.59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit employé [4].



**Figure 17. Essai de ressuage à l'aéromètre [4].**

En résumé, le tableau 4 donne les valeurs préconisées pour l'obtention d'un BAP selon l'AFGC.

**Tableau 4. Valeurs préconisées pour les essais selon AFGC [1].**

Etallement	de 60 cm à 75 cm
$H_2/H_1$	$\geq 0.8$
Laitance (P)	$\leq 15\%$

## II.7. PROPRIETES DES BAP A L'ETAT DURCI

Les particularités de composition des bétons autoplacants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons vibrés [4].

### II.7.1. Propriétés mécaniques

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition.

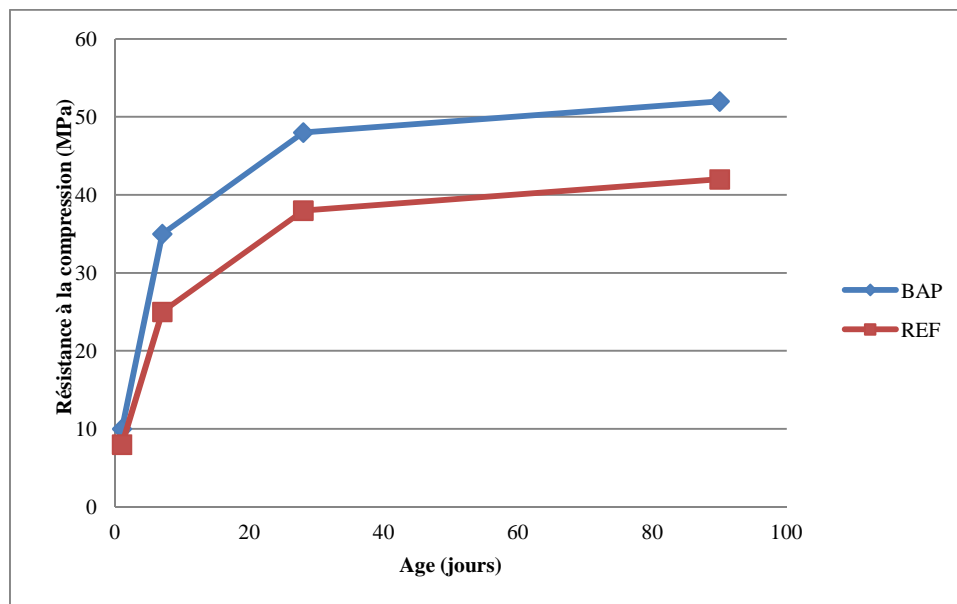
Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats, ou inclusions. Les propriétés de ce mélange

(retrait, fluage) dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait [4].

### II.7.1.1. Résistance mécanique

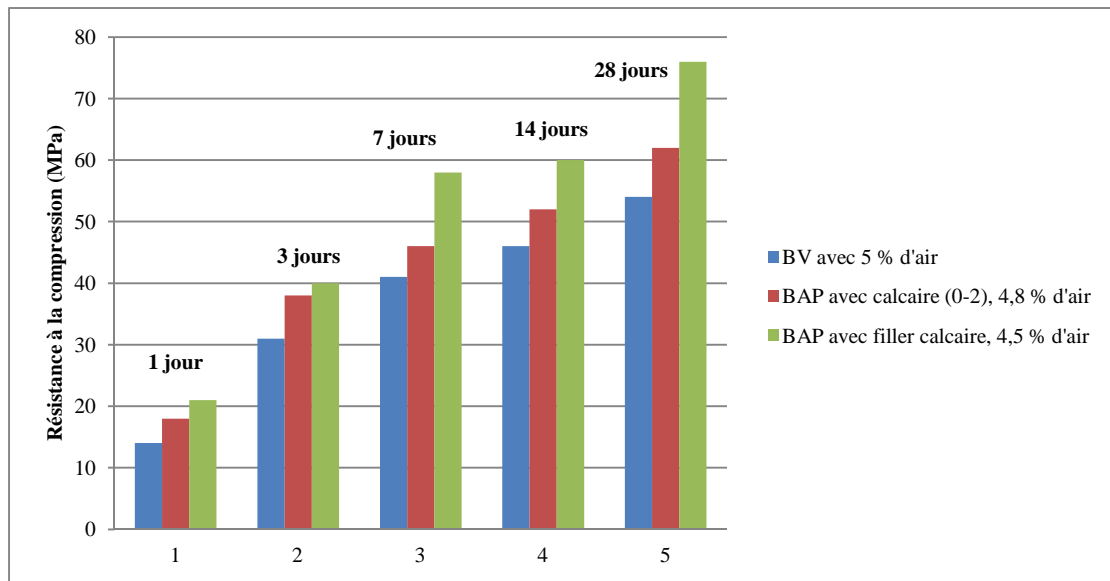
L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite [4].

Différentes données ont été publiées sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes (voir figure 18).



**Figure 18. Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un béton de référence (REF) correspondant [4].**

De plus, certains auteurs affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande (figure 18). Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours.



**Figure 19. Résistance mécanique d'un béton vibré (BV) et de deux BAP (de formulation différente) [4].**

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton.

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges.

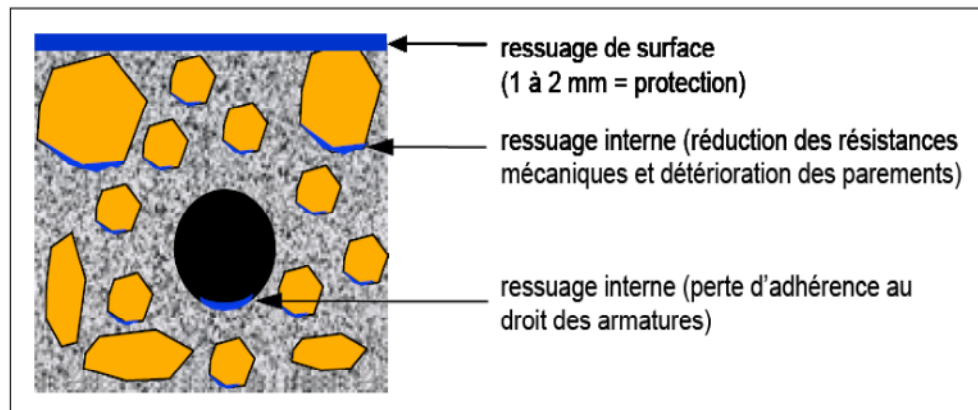
De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

### II.7.1.2. Retrait (état frais, état durci) [4]

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. Etant 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 (voir figure 20).



**Figure 20. Phénomène de ressuage [4].**

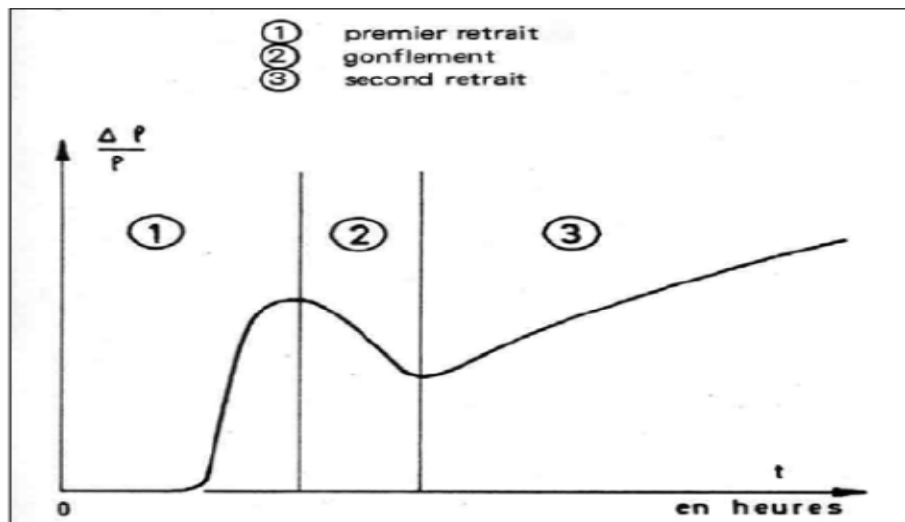
Pendant cette période, dite dormante, la réaction d'hydratation commence et un premier dégagement de chaleur apparaît dès la mise en contact du ciment et de l'eau. Des hydrates sont produits depuis la périphérie vers le centre des grains de ciment anhydres et leur volume est inférieur aux réactifs. Cette diminution de volume peut être considérée comme un retrait chimique. Elle est couramment appelée contraction de Le Chatelier.

A partir du début de prise, le développement de la formation des hydrates constitue un squelette devenant de plus en plus dense et résistant. La contraction, due à la différence de volumes entre produits et réactifs, va donc être progressivement restreinte. Cependant, l'eau ne peut compenser entièrement cette diminution de volume et se transforme alors en vapeur à l'intérieur des pores. Ces pores jouent le rôle d'interface liquide/vapeur et les tensions capillaires engendrées par ce changement de phase provoquent une compression du squelette rigide : ceci constitue une réduction de volume supplémentaire. Il s'agit du retrait d'auto dessiccation.

D'autre part, une composante supplémentaire peut s'ajouter à ce retrait plastique. En effet, si l'eau superficielle (due au ressuage) s'évapore plus rapidement qu'elle n'est formée, le dessèchement du béton crée une dépression qui contracte le matériau. On parle alors de retrait

de séchage ou de dessiccation. L'hygrométrie ambiante, la présence de vent ou l'absence de produit de cure sont des paramètres influents sur la valeur de ce retrait de séchage.

Une fois le retrait plastique (ou premier retrait) observé, une phase de gonflement peut également être constatée sur des matériaux cimentaires (figure 21). Celle-ci a une durée très variable et encadre la prise.



**Figure 21. Courbe type de déformation au jeune âge d'une pâte de ciment [4].**

Après la prise, les déformations du béton sont également d'origine hydrique (retrait endogène dû à l'auto-dessiccation) 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.

#### II.7.1.2.a. Retrait thermique

Il 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 de la masse de ciment et d'additions [4].



### II.7.1.2.b. Retrait endogène

L'apparition du retrait endogène est due 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'auto-dessiccation, est la conséquence macroscopique de cette contraction d'origine chimique [4].

### II.7.1.2.c. Retrait de dessiccation

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 [4].

## II.7.2. Propriétés physico-chimiques et durabilité [4]

La plupart des processus de détérioration touchant les structures en béton, impliquent les transferts de matière (en particulier d'agents agressifs) à l'intérieur d'un matériau poreux comme le béton. Il est couramment prétendu que meilleure est la résistance d'un béton à ces transferts, plus durable sera celui-ci. Les propriétés de transfert du béton sont donc utilisées progressivement comme critère de sa durabilité. La pénétration de gaz, d'eau ou d'autres fluides dans le béton s'effectue par l'intermédiaire des pores de la matrice cimentaire et des interfaces pâte - granulats. Les trois principaux mécanismes des transferts de fluides à l'intérieur du béton sont la perméation, la diffusion et l'absorption. La perméation concerne le transfert de matière dû à un gradient de pression. La diffusion est le mécanisme par lequel un fluide se déplace sous l'action d'un gradient de concentration et l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires.

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction).

Les règles applicables pour les bétons courants restent donc normalement applicables aux BAP (norme XP 18-305 maintenant NF EN 206-1, ou fascicule 65A).

Là encore, la durabilité est une propriété qui a été relativement peu étudiée pour les BAP jusqu'à présent. Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure

des bétons autoplaçants, la perméabilité (aux gaz), la migration des ions chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation et leur résistance au gel - dégel.

Les caractéristiques microstructurales des BAP sont principalement influencées par :

- un volume de pâte élevé,
- la présence d'additions en quantité importante,
- un réseau de bulles d'air plus ou moins dense.

L'influence des additions sur la matrice cimentaire dépend de la taille des particules, de leurs compositions chimiques et minéralogiques. Les plus fines d'entre elles permettent d'accroître la compacité du squelette granulaire et aussi de diminuer l'épaisseur et la porosité des auréoles de transition (interfaces pâte –granulats, zone plus poreuse avec des pores plus gros). En ce qui concerne la densité du réseau de bulles d'air, celle-ci dépend de l'utilisation ou non d'un entraîneur d'air spécifique mais également de l'effet entraîneur d'air du superplastifiant et/ou de l'agent de viscosité utilisés. La durée de malaxage est également un facteur important: un malaxage prolongé peut multiplier par deux le volume d'air occlus.

## II.8. FABRICATION, TRANSPORT ET MISE EN ŒUVRE DES BAP

### II.8.1. Fabrication

La formulation des BAP est plus pointue que celles des bétons traditionnels, nécessite la mise en place de procédures de fabrication et de contrôles adaptées.

La plupart des malaxeurs peuvent fabriquer des BAP; le temps de malaxage est toutefois légèrement plus long que pour un béton classique. Il faut que le mélange, riche en éléments fins et en adjuvants, soit le plus homogène possible. Certaines formules peuvent nécessiter des séquences de malaxage spécifiques (ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur, temporisation, temps de malaxage adaptés...).

L'un des points les plus importants de la fabrication est le contrôle strict de la teneur en eau du mélange en tenant compte de façon permanente de celle des granulats. Un contrôle renforcé des constituants doit être mis en place tout au long de la fabrication afin de maintenir la régularité de l'ensemble des performances.

L'hyperfluidité du béton conduit, à prendre des dispositions spécifiques pour éviter des déversements et à adapter l'ouvrabilité au temps de transport et de mise en œuvre [24].

### II.8.2. Transport

En raison de sa fluidité élevée, le BAP ne peut être transporté qu'au moyen d'un camion malaxeur. Il est indispensable de faire tourner la toupie lentement pendant toute la durée du transport. Un clapet de fermeture est recommandé pour les transports dans des endroits à forte pente. Avant de décharger le béton, il faut faire tourner la toupie à vitesse élevée durant deux minutes environ.

Comme dans le cas du béton vibré, l'ouvrabilité du BAP peut se modifier pendant la durée du transport. La manière et l'ampleur de cette modification dépendent de nombreux facteurs comme les types d'adjuvants, le dosage en eau, la durée du transport et la température. Les producteurs de béton doivent en tenir compte de manière adaptée à leur expérience.

Dans une certaine mesure, il est possible d'en tenir compte en corrigeant pour la fabrication les exigences d'ouvrabilité spécifiées par le client et normalement souhaitées au moment du déchargement sur le chantier. En cas de retard imprévu et du raidissement du béton qui peut s'ensuivre, il est également possible dans le cas du BAP d'effectuer certaines corrections appropriées sur le chantier. Le temps de malaxage minimal recommandé en cas de rajout d'adjuvant dans le camion malaxeur doit être impérativement respecté, afin d'assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. Tout rajout d'eau est en revanche à proscrire [29].

### II.8.3. Mise en œuvre des BAP sur chantier

D'une manière générale les contraintes de mise en œuvre des BAP sont nettement plus faibles que celles des bétons mis en œuvre par vibration, grâce à leur facilité de coulage sur de longues distances et de grandes hauteurs.

Les propriétés d'écoulement des BAP donnent lieu à la mise en place de nouvelles procédures de remplissage des coffrages. Les caractéristiques du BAP autorisent des cheminements horizontaux importants. Ils peuvent être mis en œuvre, soit de façon traditionnelle à la benne à manchette, soit par pompage (en tête ou en pied de coffrage). Le pompage permet une mise en œuvre plus rapide du béton. L'extrême fluidité des BAP nécessite de soigner particulièrement l'étanchéité des coffrages.

Il est important de limiter leur hauteur de chute dans les coffrages afin d'éviter toute ségrégation en amenant le bas de la manchette en limite de la zone de bétonnage.

Le coffrage doit être rigide, étanche et résistant (éventuellement renforcé pour résister à la pression en pied de coffrage). Les produits démoulant doivent être parfaitement adaptés. La hauteur du coulage doit être compatible avec la tenue du coffrage à la poussée du béton.

En usage courant (voile de 2.8 m de hauteur), la poussée lors du coulage ne dépasse pas les limites de résistance des coffrages. Il convient d'équilibrer les pressions de part et d'autres des ouvertures. Pour des voiles de grande hauteur, quelques précautions particulières doivent être prises (il faut adapter par exemple la vitesse de bétonnage).

Une cure efficace doit être mise en œuvre le plus tôt possible après la fin du bétonnage, particulièrement pour les surfaces horizontales afin d'éviter toute évaporation précoce d'eau. Les BAP ne nécessitent pas d'opération de surfacage pour les applications horizontales. Leurs performances à l'état frais autorisent leur pompage sur de longues distances et de nouvelles possibilités de mise en œuvre [24].

## II.9. CONCLUSION

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides dont la mise en place sans vibration présente plusieurs avantages tant au niveau environnemental, humain, technologique qu'économique qui intéressent de plus en plus les industriels [4].

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, du dosage en ciment, d'eau, ainsi que d'adjuvants afin de réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées pour la construction de l'ouvrage, ou de la partie d'ouvrage en cause [31].

La formulation des BAP fait appel à [24] :

- des superplastifiants pour obtenir la fluidité souhaitée et quelques fois des agents de viscosité pour maîtriser la ségrégation et le ressuage ;
- une quantité de fines (ciments, fillers calcaires, cendres volantes) élevée pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage ( $\sim 500 \text{ kg/m}^3$ );
- un volume de pâte élevé ( $350 \text{ à } 400 \text{ l/m}^3$ ) ;
- un faible volume de gravillons afin d'éviter le « blocage du béton » dans les zones confinées (rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 voire inférieur). Les granulats ont en général un  $D_{\max}$  compris entre 10 et 16 mm afin d'améliorer l'écoulement ;
- du ciment (dosage à optimiser pour obtenir les performances souhaitées) ;
- un rapport E/C faible et un dosage en eau limité ;
- éventuellement un agent entraîneur d'air pour assurer la protection contre les effets du gel dégel.

L'optimisation du squelette granulaire est indispensable pour obtenir les caractéristiques nécessaires à la fluidité et à l'écoulement en milieu confiné.

## I.1. INTRODUCTION

La partie expérimentale contient trois parties essentielles ; on a commencé par la caractérisation des matériaux qui est la première étape nécessaire et indispensable avant la confection des bétons. Elle sert à donner les propriétés chimiques, physiques et mécaniques tout en effectuant un certain nombre d'essais pour les différents matériaux utilisés. Ensuite on a réalisés différentes gâchées préliminaires afin d'adopter la formulation qui satisfait les caractéristiques du béton autoplaçant à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Puis on a entamé la partie de l'interprétation et discussion des résultats. Enfin on a abouti à la conclusion générale et des perspectives.

## I.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX

### I.2.1. Origines des matériaux

#### a. Ciment

Ciment Résistant aux Sulfates (CRS) : CPA CEM I - 42.5 NA 443 de surface Blaine (3000 - 3200  $\text{cm}^2/\text{g}$ ) et de masse volumique de (3-3.1 $\text{kg}/\text{m}^3$ ), (Voir l'annexe A).

#### b. Sable

Sable lavé de fraction 0/3 provenant de Taharachte d'Akbou (wilaya de Bejaia).

#### c. Graviers

Deux classes granulaires de gravier sont utilisées dans ce travail :

La fraction 3/8 et la fraction 8/15 provenant de Djebel Youcef de Bouandas (wilaya de Sétif).

#### d. Additions minérales

Deux additions minérales sont employées dans la formulation du béton autoplaçant :

- Un filler calcaire de diamètre inférieur à **63 $\mu\text{m}$**  issus de la poudre de ponçage de carrelage (usine de carrelage à Bejaia).

- Argile cuite broyée (ACB) : l'argile à l'état brut provient d'Oued Remila de la wilaya de Bejaia, elle est broyée puis tamisée sous un tamis de **63 $\mu\text{m}$**  ensuite cuite à la température de **750°C** dans un récipient en fonte avec couvercle pendant **une heure**, en fin elle est tamisée une deuxième fois à 63 $\mu\text{m}$  (après la cuisson pour éliminer les grumeaux qui se sont formés).

### e. Adjuvants

On a utilisé dans notre travail deux adjuvants fabriqués par la société Granitex-NP à savoir :

- **MEDAFLOW 30** qui est un superplastifiant (Sp) haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés de bétons. Il permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. Il ne présente pas d'effet retardateur. (Voir l'annexe B).

- **MEDACOL BSE** qui est un agent de viscosité destiné principalement à la confection des bétons et mortiers coulés sous l'eau. Il est composé essentiellement d'agents colloïdaux (Ac) et de micro silice ultra fine. (Voir l'annexe C).

### f. Eau de gâchage

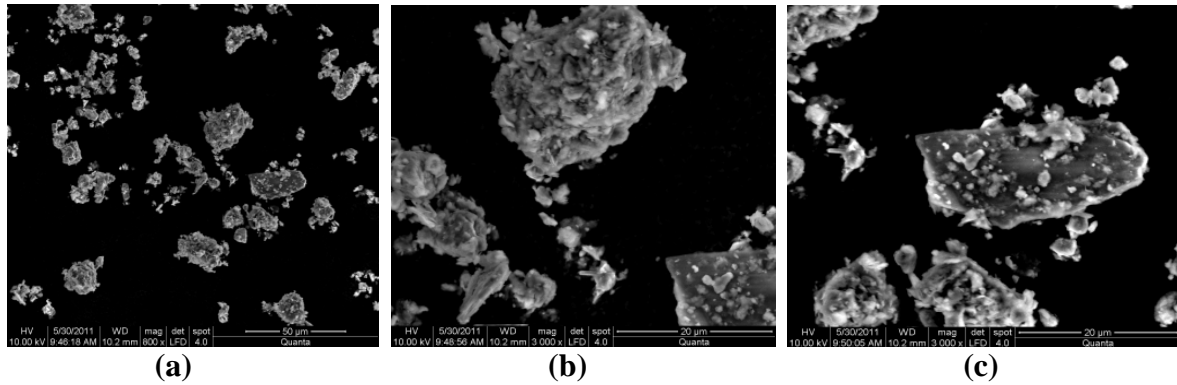
L'eau utilisée dans ce présent travail est l'eau potable donc elle ne nécessite aucun essai. Elle est conforme aux exigences de la norme (NF EN 1008).

## I.2.2. Analyses chimiques des matériaux

Elle se compose de deux parties : la morphologie et la composition chimique, à savoir :

### I.2.2.A. Morphologie

Le microscope électronique à balayage (MEB) nous a donné la morphologie (description globale) des matériaux suivants : l'argile à l'état brut, l'argile cuite et le calcaire. Voir les figures 22, 23, 24 et 25 suivantes :

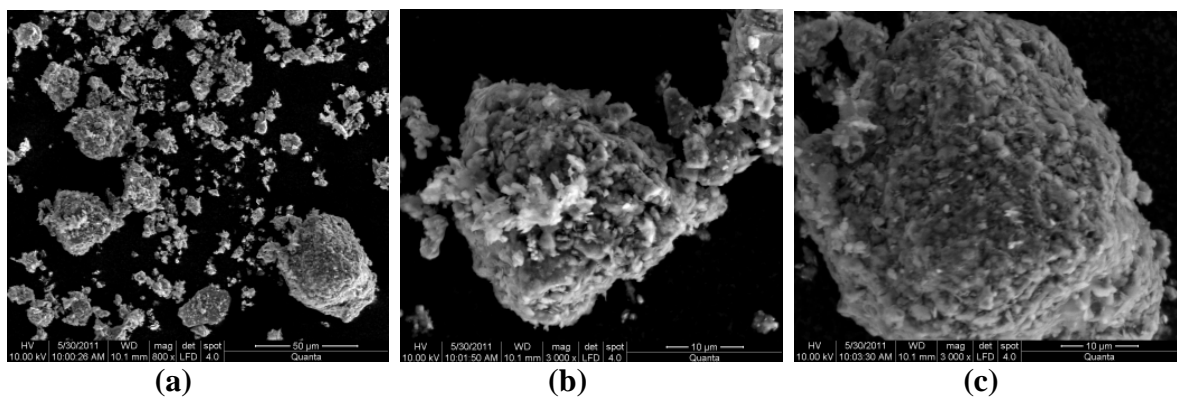


**Figure 22. Argile non cuite, broyée (ANCB).**

La figure (a) montre que les grains d'argile à l'état brut ont des tailles et des formes variables, donc sa granulométrie est variable (non uniforme : distribution hétérométrique des particules d'ANCB). Comme on remarque une porosité importante entre les grains.

La figure (b) montre le rassemblement (colmatage) des particules fines sous forme d'un amas.

La figure (c) montre quelques particules fines qui collent sur un gros grain d'ANCB.



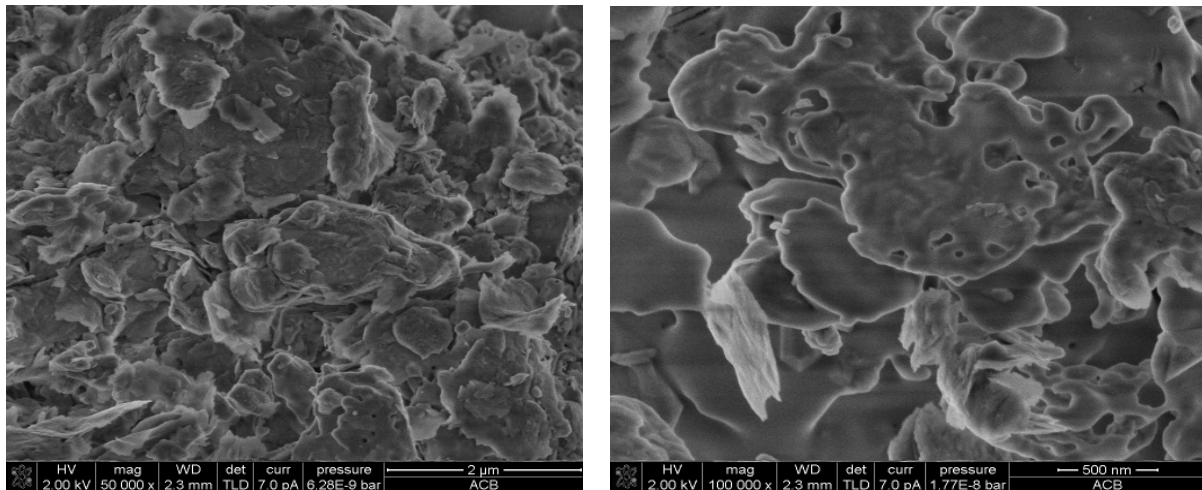
**Figure 23. Argile cuite broyée (ACB).**

La figure (a) montre que la porosité entre les particules de l'ACB a diminuée après la cuisson de l'argile à 750°C et que les grains se rapprochent les uns des autres et forment des amas plus gros que ceux qui sont formés à l'état brut.

Les figures (b) et (c) montrent la formation des amas dense de forme moyenne à plus grande respectivement.

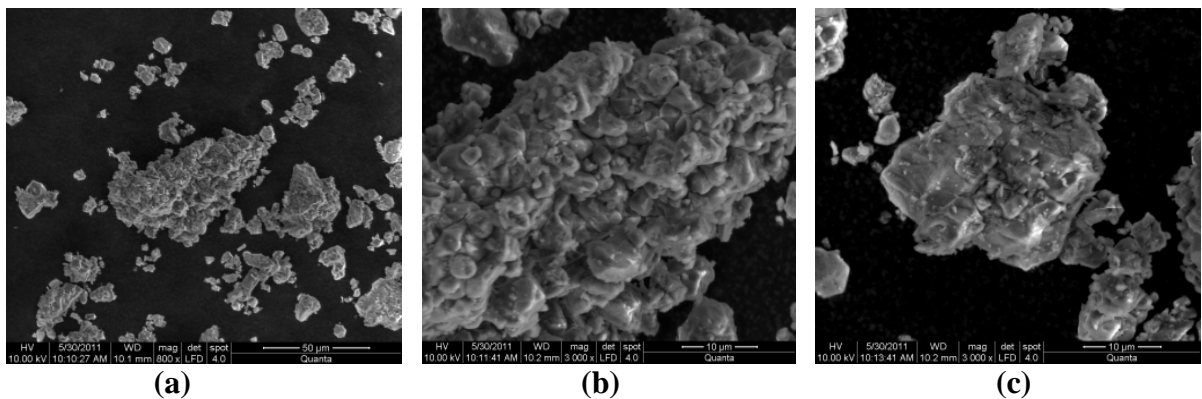
Pour voir clairement la structure des particules de l'ACB, une analyse microscopique en profondeur a été réalisée par la prise de deux photos de l'ACB à 2 μm et à 500 nm voir les figures suivantes :





**Figure 24. Structure de l'ACB sous le MEB à 2  $\mu\text{m}$  et à 500 nm respectivement.**

D'après les deux images ci-dessus, l'ACB est constituée de couches de feuillets qui peuvent contenir de l'eau adsorbée entre elles (eau superficielle : facile à s'évaporer).



**Figure 25. Filler calcaire.**

La figure (a) montre une porosité moyenne et une granulométrie hétérométrique avec des particules plus grandes que celles de l'argile soit à l'état brut ou après la cuisson voir la figure 27.

La figure (b) montre un arrangement des grains moins dense que celui de l'argile et il forme un amas de particules de taille plus au moins égale.

La figure (c) montre quelques grains qui se collent sur une particule de taille plus grande de calcaire.

**I.2.2.B. Composition chimique**

Le tableau suivant illustre les analyses chimiques élémentaires effectuées sur les fines utilisées.

**Tableau 5. Composition chimique des fines utilisées.**

Pourcentage en masse des constituants (%)	Argile cuite broyée [18] (ACB)	Filler calcaire [42]
SiO <sub>2</sub>	46.80	0.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.90	0.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.10	0.00
CaO	16.50	54.84
MgO	2.40	0.10
SO <sub>3</sub>	1.10	0.60
K <sub>2</sub> O	2.10	0.10
Na <sub>2</sub> O	1.12	0.02
TiO <sub>2</sub>	0.47	-
MnO	0.03	-
S	0.09	-
fr.CaO	0.00	-
wl.CaO	0.96	-
wl.MgO	0.00	-
wl.K <sub>2</sub> O	0.04	-
wl.Na <sub>2</sub> O	0.09	-
wl.SO <sub>3</sub>	0.09	-
Tv.100C	0.10	-
Gv.1000C	9.60	-

Avec :

fr : libre.

wl : dissolution dans l'eau.

Tv.100C : disparition des matières organique à la température de 100 °C.

Gv.1000C : disparition des matières organique à la température de 1000 °C.

Le tableau 5, nous montre que le filler utilisé est un calcaire dont le taux de CaO est de 54,84 %. Il nous donne aussi plus de détails sur l'état des éléments de l'ACB :

- Le pourcentage de CaO libre est nul implique pas de risque de gonflement avec la présence de l'eau.

- On a de faibles quantités d'alcalins K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O qui sont solubles dans l'eau, ce qui induit une alcalinité faible donc le risque de la formation du gel calco-silico-alcalin gonflant, qui est

connu sous le nom de réaction alcali-silice reste minime. On peut conclure que, l'altération interne n'est pas à craindre dans les bétons à formuler avec ces matériaux.

- On a aussi une faible quantité de  $\text{SO}_3$  soluble dans l'eau, donc la formation de l'étringite reste minime aussi.

- Selon la norme américaine ASTM C 618-98, un matériau est pouzzolanique, quand :  
 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70 \%$  (cette condition est nécessaire mais non suffisante).

La somme de ces trois composantes pour notre ACB se rapproche de 70 %, donc on peut dire que l'ACB est un matériau pouzzolanique.

D'après la même norme américaine, la plus part des argiles non cuites qui ont une teneur en ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) à 80 %, deviennent pouzzolanique lorsqu'elles sont calcinées.

L'argile à l'état brute ne réagit pas à cause de sa structure cristalline. Lors de la calcination de l'argile à une température supérieure à 500 °C, il y aura un changement de structure cristalline vers une structure amorphe ce qui lui permet de réagir.

### I.2.3. Analyse granulométrique

#### I.2.3.1. Analyse granulométrique par tamisage NF P18-560

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisât sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

#### - Préparation de l'échantillon pour l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme **P 18-553**. La masse  $M$  de l'échantillon pour essai doit être supérieure à  $0,2 D$ , avec  $M$  exprimé en kilogrammes et  $D$  plus grande dimension spécifiée en millimètres.

Les résultants des analyses granulométriques du sable 0/3, des graviers 3/8 et 8/15 sont représentées dans les tableaux suivants:

**Tableau 6. Analyse granulométrique du sable 0/3.**

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : P = 2360 grs			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (grs)	Refus cumulés en (%) $R(\%) = (Rn/P) \times 100$	Tamisât cumulés en (%) $T(\%) = 100\% - R(\%)$
5	10	0.42	99.58
2.50	540	22.88	77.12
1.25	1092	46.27	53.73
0.63	1475	62.52	37.50
0.315	1790	75.84	24.16
0.160	1980	83.89	16.11
0.080	2206	93.47	6.53
0.063	2216	93.89	6.11
Fond du tamis	2218	93.98	6.02
Module de finesse (NF P 18-540): $MF = 1/100 \sum$ Refus cumulés en % des tamis {0,16- 0,315- 0,63- 1,25- 2,5- 5 mm} <b>MF=2.91</b>			

La finesse est acceptable d'après la norme XP P 18-540 et selon le module de finesse trouvé, le sable est classé en catégorie MF<sub>B</sub> (L<sub>i</sub> 1.8, L<sub>s</sub> 3.2).

**Tableau 7. Analyse granulométrique du gravier 3/8.**

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : P = 2910 grs			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (grs)	Refus cumulés en (%) $R(\%) = (Rn/P) \times 100$	Tamisât cumulés en (%) $T(\%) = 100\% - R(\%)$
10	62	2.13	97.87
8	692	23.78	76.22
6.3	1776	61.03	38.97
5	2438	83.78	16.22
2.5	2880	98.96	1.04
1.25	2888	99.24	0.76
Fond du tamis	2910	100.00	0.00

Tableau 8. Analyse granulométrique du gravier 8/15.

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : P = 3958 grs			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (grs)	Refus cumulés en (%) $R(\%) = (Rn/P) \times 100$	Tamisât cumulés en (%) $T(\%) = 100\% - R(\%)$
16	58	1.47	98.53
12.5	1044	26.38	73.62
10	2290	57.86	42.14
8	3048	77.01	22.99
6.3	3728	94.19	5.81
5	3896	98.43	1.57
2.5	3946	99.70	0.30
Fond du tamis	3958	100.00	0.00

La figure ci-dessous présente les courbes granulométriques des granulats utilisés dans le béton autoplaçant.

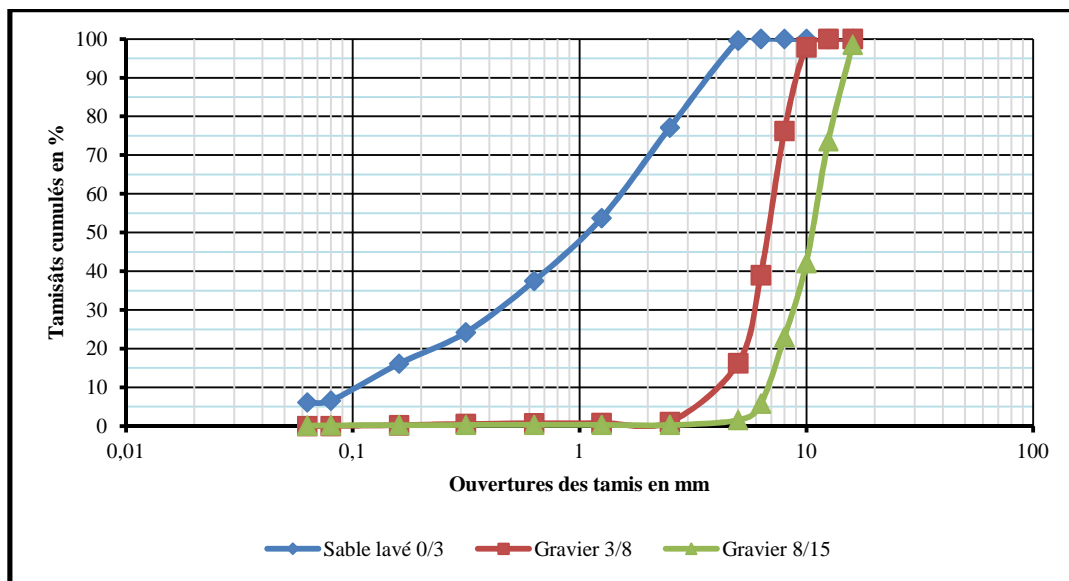


Figure 26. Courbes granulométriques des différents granulats utilisés.

L'utilisation des granulats de différentes fractions (0/3, 3/8 et 8/15) a permis d'avoir une granulométrie globale uniforme grâce à la continuité de la courbe granulométrique.

Le sable ne contient que 10 % des éléments dont le diamètre est inférieur à 0,1 mm (voir la figure 26) ; et d'après son module de finesse MF = 2,91, le sable est classer grossier.

### I.2.3.2. Analyse sédimentométrique NF P94-057

La présente norme a pour objet la détermination de la distribution pondérale de la taille des particules fines d'un sol. Elle s'applique aux éléments d'un sol naturel passant à travers le tamis à maille carrée de 80 $\mu$ m d'ouverture.

Cet essai utilise le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins à très fins est fonction de leur dimension. La loi de Stokes donne, dans le cas de grains sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains et leur vitesse de sédimentation. Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents de particules.

La loi de Stokes est donnée par la relation suivante :

$$V = g \times \frac{\rho_s - \rho_0}{18 \times \mu} \times d^2.$$

V : Vitesse de décantation de la particule (cm/s).

g : Accélération de la pesanteur (cm/s<sup>2</sup>).

$\rho_s$  : Poids spécifique de la particule (KN/m<sup>3</sup>).

$\rho_0$  : Poids spécifique du liquide de décantation (KN/m<sup>3</sup>).

$\mu$  : Viscosité du liquide de décantation (poise = 1g/cm/s).

d : Diamètre de la particule (cm).

L'eau et les fines ayant passé au tamis de 80 $\mu$ m sont recueillies et après décantation et passage à l'étuve jusqu'à dessiccation complète, le matériau est désagrégé. Ensuite, 80 g de sol qui est mis en inhibition pendant 12 à 15 heures dans une solution de 500 cm<sup>3</sup> d'eau distillée additionnée à 60 cm<sup>3</sup> d'une solution défloculante d'hyxamétaphosphate de sodium à 5%. L'ensemble est mis à une agitation mécanique de 10000 à 12000 tr/min pendant 3 minutes afin de bien séparer les grains. La suspension ainsi préparée est versée dans une éprouvette de 2 litres et complétée jusqu'au remplissage d'eau distillée. La suspension est ensuite agitée manuellement et après juste la fin de l'agitation, le chronomètre est déclenché, c'est le début de la sédimentation. Des mesures au densimètre sont effectuées à : 30s, 1mn, 2mn, 5mn, 10mn, 20mn, 30mn, 1h, 4h et 24h. Les distributions granulométriques des éléments fins sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 9. Analyse sédimentométrique des éléments fins.

Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	Passants (%)		
	Ciment CEM I	Filler calcaire	Argile (ACB)
80	100	100	100
77	96	86	88
55	92	82	84
38	84	72	80
25	56	62	70
17	8	50	64
12	4	38	58
9	4	26	48
7	2	20	43
3.9	2	4	33
1	1	0.8	19
0.1	0	0	0

La figure ci-dessous présente les courbes sédimentométriques des additions minérales utilisées dans le béton autoplaçant.

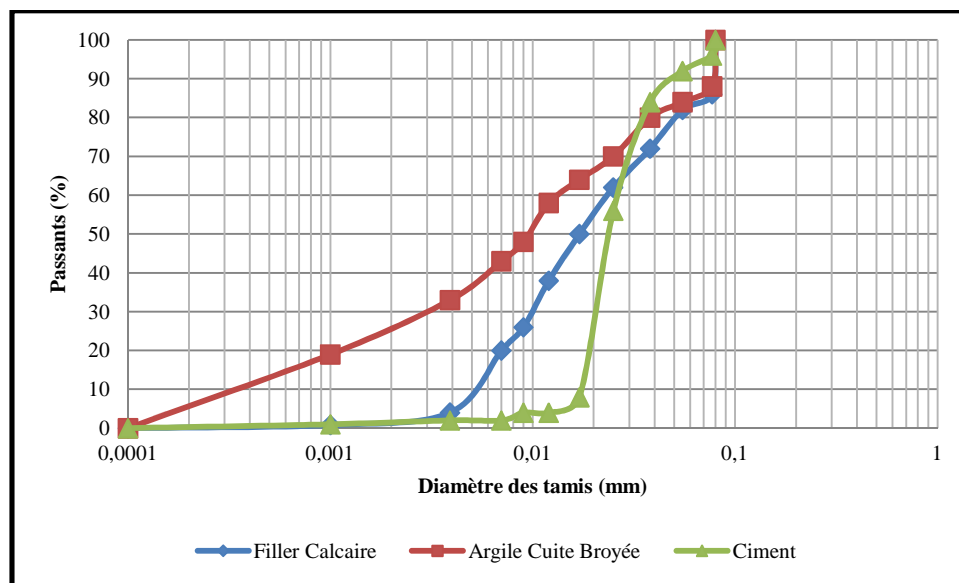


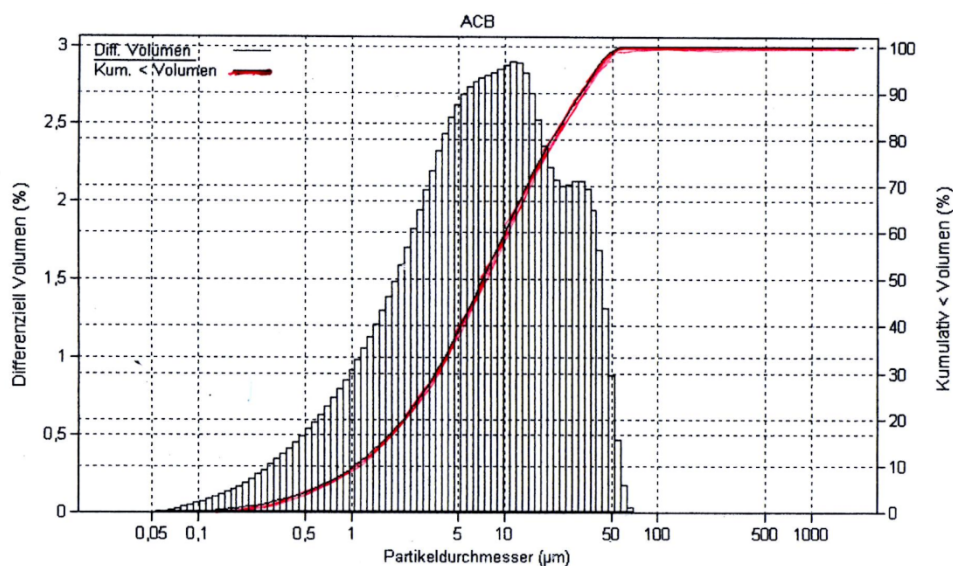
Figure 27. Courbes sédimentométriques du ciment et des additions minérales utilisées.

D'après la figure 27, on peut classer les matériaux (ciment et les additions minérales) comme suit :

La quantité de fines est : importante pour l'argile cuite broyée, moyenne pour le filler calcaire et moins importante pour le ciment.

Donc l'utilisation des additions minérales servent à corriger la granulométrie du ciment afin qu'elle possède des particules variées ce qui est favorable pour le ciment (compléter les vides qui existent entre ces particules et avoir la compacité souhaitée du ciment).

La figure 28, nous donne la distribution granulaire de l'ACB faite à l'aide de l'infra rouge, voir la figure ci après :



**Figure 28. Distribution granulaire des particules d'ACB.**

D'après la figure ci-dessus, la courbe de distribution granulaires de l'ACB montre un domaine de grosseur des particules de 0,05 jusqu'à 63 µm. Cette distribution confirme le tamisage de l'ACB à travers le tamis de 63µm. Cette courbe montre aussi que cette distribution est très riche en particules fines : 40 % de ces particules sont inférieure à 5µm et 60 % de ces particules sont inférieure à 10µm. C'est la richesse en particules fines qui nous donne une surface spécifique de Blaine de **9140 cm<sup>2</sup>/g**.

#### **I.2.4. Coefficient d'aplatissement NF P18-561 et NF EN 933-3**

L'essai de détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des essais permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.



L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme P 18-553. La masse  $M$  de l'échantillon pour essai doit être supérieure à  $0.2D$ , avec  $M$  exprimé en kilogrammes et  $D$ , plus grande dimension spécifiée, exprimé en millimètres.

L'échantillon est passé sur un tamis de 4 mm, la masse du refus est  $M_0$ .

$A_i$  : Coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire  $d/D$  correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes, il est exprimé en pourcentage.

$$A_i = \frac{M_{ei}}{M_{gi}} 100.$$

$M_{gi}$  : Masse de chaque classe granulaire  $d/D$ , en grammes.

$M_{ei}$  : Masse des éléments de chaque classe granulaire  $d/D$  passant sur la grille correspondante.

$A$  : Coefficient d'aplatissement global de l'échantillon est égal à la somme pondérée des coefficients d'aplatissement des différentes classes granulaires  $d/D$  composant l'échantillon.

$$A = \frac{\sum M_{ei}}{M} 100 ; M = \sum M_{gi}.$$

Les résultats obtenus sont illustrés dans les tableaux suivants :

<b>Tableau 10. Coefficient d'aplatissement du gravier 3/8.</b>				
<b>Tamisage sur tamis</b>		<b>Tamisage sur grille</b>		
<b>Classe granulaire d/D</b>	<b><math>M_{gi}</math> (g)</b>	<b>Ecartement des grilles (mm)</b>	<b>Passants <math>M_{ei}</math>(g)</b>	<b><math>A_i = \frac{M_{ei}}{M_{gi}} 100</math></b>
8-10	1265	5	105	8.3
6.3-8	1230	4	150	12.20
5-6.3	695	3.15	65	9.35
4-5	475	2.5	35	7.37
$M = \sum M_{gi} = 3665$		$\sum M_{ei} = 355$		
$M_0 = 3066$		$\sum M_{gi} = 3665 > 0.98 \times 3066$		
<b><math>A = \frac{\sum M_{ei}}{M} 100 = 9.68 \approx 10\%</math></b>				

<b>Tableau 11. Coefficient d'aplatissement du gravier 8/15.</b>				
<b>Tamissage sur tamis</b>		<b>Tamissage sur grille</b>		
<b>Classe granulaire d/D</b>	<b>M<sub>gi</sub> (g)</b>	<b>Ecartement des grilles (mm)</b>	<b>Passants M<sub>ei</sub> (g)</b>	<b>A<sub>i</sub> = <math>\frac{M_{ei}}{M_{gi}}100</math></b>
16-20	125	10	43	34.40
12.5-16	1555	8	308	19.80
10-12.5	1550	6.3	375	24.20
8-10	845	5	180	21.30
6.3-8	475	4	117	24.63
5-6.3	60	3.15	15	25
4-5	23	2.5	4	17.40
M = $\sum M_{gi} = 4633$		$\sum M_{ei} = 1042$		
M <sub>0</sub> = 4582		$\sum M_{gi} = 4633 > 0.98 \times 4582$		
<b>A = <math>\frac{\sum M_{ei}}{M} 100 = 22.5 \approx 23\%</math></b>				

Les catégories des granulats en fonction de leurs coefficients d'aplatissement sont données par la norme XP P 18-540.

**Tableau 12. Classement des granulats suivant leurs coefficients d'aplatissement.**

<b>Fraction</b>	<b>Coefficient d'aplatissement (A)</b>	<b>Valeur spécifique supérieure</b>	<b>Catégorie</b>
3/8	10%	20	A <sub>A</sub>
8/15	23%	30	A <sub>B</sub> et A <sub>C</sub>

Les coefficients d'aplatissement des graviers étudiés sont acceptables, donc leur forme est favorable (on peut utiliser ces graviers dans la formulation du béton autoplaçant).

### **I.2.5. Masse volumique NF P 18-554, NF P 18-555 et NF P 18-558**

#### **I.2.5.1. Masse volumique absolue**

La masse volumique absolue est définie comme le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de sa matière (volume absolu tous vides déduits).

**A. Méthode de l'éprouvette**

Cette méthode consiste à mettre dans une éprouvette graduée un volume d'eau  $V_1$  et verser une masse  $M$  d'un échantillon sec en prenant soin d'éliminer aussi bien que possible les bulles d'air. Puis relever le nouveau volume  $V_2$  et calculer la masse volumique par la relation :

$$\rho_s = M / (V_2 - V_1).$$

Répéter 3 fois la manipulation et calculer la masse volumique moyenne.

On verse chacune des masses de : 200g de la classe granulaire 8/15, 150g de la 3/8 et 150g de la 0/3 dans un volume de 200 cm<sup>3</sup> de l'eau dans une éprouvette graduée ; les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

**Tableau 13. Masses volumiques absolues des granulats par la méthode de l'éprouvette.**

Echantillons		Volumes $V_2$ (cm <sup>3</sup> )	Masse volumique absolues $\rho_s$ (g/ cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ moyenne (g/ cm <sup>3</sup> )
0/3	1	260	2.50	<b>2.53</b>
	2	258	2.58	
	3	260	2.50	
3/8	1	257	2.63	<b>2.58</b>
	2	260	2.50	
	3	257	2.63	
8/15	1	275	2.67	<b>2.67</b>
	2	275	2.67	
	3	275	2.67	

**B. Méthode du pycnomètre**

Soit  $M_1$  et  $M_2$  les masses d'un pycnomètre sec vide et rempli d'eau respectivement, et  $M_3$  la masse de l'échantillon soumis à l'essai. Introduire la prise d'essai dans un pycnomètre vide de sorte que le volume occupé par l'échantillon soit de trois quart (75 %) du volume du pycnomètre. Compléter avec l'eau jusqu'au remplissage du pycnomètre et fermer le bouchon soigneusement pour éliminer toutes les bulles d'air. Peser ensuite le pycnomètre, soit  $M_4$  sa masse.

La masse volumique absolue est donc déterminée par la relation :  $\rho_s = \frac{M_3 - M_1}{(M_2 - M_1) - (M_4 - M_3)}$

La masse du pycnomètre vide  $M_1 = 301,78\text{g}$ .

La masse du pycnomètre remplie d'eau  $M_2 = 879,09\text{g}$ .

Les résultats des différentes prises d'essais sont les suivants :

**Tableau 14. Masses volumiques des fines.**

Echantillons		$M_3$ (g)	$M_4$ (g)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ moyenne (g/cm <sup>3</sup> )
Filler calcaire	1	723.40	1139.61	2.62	<b>2.62</b>
	2	725.50	1141.50	2.62	
	3	723.30	1140.10	2.62	
ACB	1	585.10	1053.41	2.60	<b>2.60</b>
	2	580.20	1050.30	2.59	
	3	587.08	1055.22	2.61	

### I.2.5.2. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est la masse d'une unité de volume d'un matériau avec vides inclus.

L'essai consiste à peser un récipient vide de masse  $M$  et de volume connu  $V$ , ensuite verser à l'intérieur le matériau, après quartage et étuvage, par couches horizontales successives en le répartissant sur toute la surface et sans tassement jusqu'au débordement du récipient, formation d'un cône. Araser avec soin à l'aide d'une réglette plate la couche débordante. Peser le récipient plein, soit  $M'$  sa masse. Effectuer au moins 3 mesures et faire une moyenne.

La masse volumique est calculée selon la formule :  $\rho_p = (M' - M) / V$ .

La masse du récipient vide et son volume sont :  $M = 796\text{ g}$  et  $V = 3887,72\text{ cm}^3$ .

Les résultats obtenus sont donnés par le tableau ci-dessous :

Tableau 15. Masses volumiques apparentes des granulats.

Echantillons		M' (g)	M' - M (g)	Masse volumique apparentes $\rho_p$ (g/ cm <sup>3</sup> )	$\rho_p$ moyenne (g/ cm <sup>3</sup> )
0/3	1	6682	5886	1.51	<b>1.51</b>
	2	6654	5858	1.50	
	3	6684	5888	1.51	
3/8	1	6462	2666	1.46	<b>1.45</b>
	2	6450	2654	1.45	
	3	6454	2658	1.45	
8/15	1	6030	5234	1.34	<b>1.35</b>
	2	6104	5308	1.36	
	3	6066	5270	1.35	

### I.2.6. Propreté superficielle NF P 18-591

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules inférieur à 0.5 mm mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2 mm.

Ces particules sont séparées par lavages sur le tamis correspondant.

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme P 18-553.

Préparer deux échantillons à partir de l'échantillon pour laboratoire : l'un de masse  $M_{1h}$  pour déterminer la masse sèche de l'échantillon pour l'essai, l'autre de masse  $M_h$  pour déterminer la masse sèche des éléments inférieurs à 0.5 mm.

#### - Détermination de la masse sèche de l'échantillon pour essai

- Peser les deux échantillons  $M_{1h}$  et  $M_h$ .
- Sécher le premier échantillon  $M_{1h}$  à l'étuve à  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  jusqu'à masse constante.
- Le peser, soit  $M_{1s}$  sa masse sèche.

La masse sèche  $M_s$  de l'échantillon soumis à l'essai de propreté est :

$$M_s = M_h \times (M_{1s} / M_{1h}).$$

#### - Détermination de la masse sèche des éléments inférieur à 0.5 mm

- Effectuer l'essai sur le matériau à la teneur en eau à laquelle il se trouve avant essai.
- Tamiser sous l'eau l'échantillon  $M_h$  sur le tamis de 0.5 mm, jusqu'à ce que l'eau qui s'écoule soit claire.

-Récupérer le refus et le sécher à l'étuve à  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  jusqu'à masse constante. Le tamiser à nouveau sur le tamis de 0.5 mm pendant une minute et le peser, soit  $m'$  sa masse sèche.

La masse sèche  $m$  des éléments inférieurs à 0.5 mm est égale à :

$$m = M_s - m'$$

La propreté superficielle est donnée par :

$$P = \frac{m}{M_s} \times 100.$$

**Tableau 16. Propreté superficielle des graviers utilisés.**

Désignation	Echantillon 3/8		Echantillon 8/15	
	Desséché à $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$	Tamis sous eau à 0.5 mm	Desséché à $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$	Tamis sous eau à 0.5 mm
Masse humide (g)	$M_{1h} = 3268$	$M_h = 3980$	$M_{1h} = 2166$	$M_h = 2910$
Masse sèche (g)	$M_{1s} = 3266$	$m' = 3958$	$M_{1s} = 2146$	$m' = 2880$
Masse sèche de l'échantillon soumis à l'essai (g)	$M_s = M_h \times (M_{1s}/M_{1h}) = 3977.56$		$M_s = M_h \times (M_{1s}/M_{1h}) = 2883.13$	
Masse sèche des éléments inférieure à 0.5 mm (g)	$m = M_s - m' = 19.56$		$m = M_s - m' = 3.13$	
Propreté superficielle $P = \frac{m}{M_s} \times 100$	<b>P = 0.50%</b>		<b>P = 0.11%</b>	

D'après la norme XP P 18-540, la valeur spécifique supérieure  $V_{ss} = 1,5$ .

**Tableau 17. Classement des granulats suivant leurs propretés superficielles.**

Fraction	Propreté (%)	Observation
3/8	$0.50 < 1.5$	<b>Graviers propres</b>
8/15	$0.11 < 1.5$	

## I.2.7. Propreté du sable

### I.2.7.1. Equivalent de sable NF P 18-597

La solution lavante a été siphonnée dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait repère inférieur, le matériau de masse sèche de  $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$  est versé soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement. Frapper fortement à plusieurs reprises la

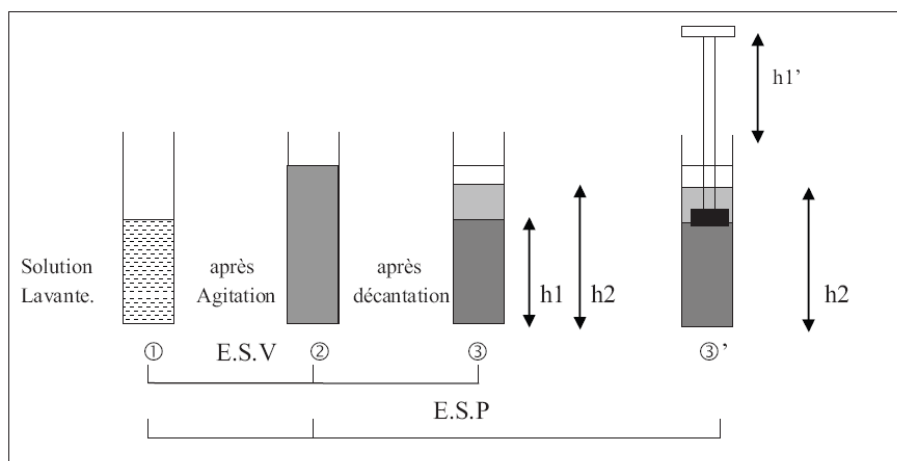
base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon. Laisser reposer dix minutes. Ensuite boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation. Faire subir à l'éprouvette 90 cycles  $\pm$  1 cycle en 30 s  $\pm$  1 s. Remettre l'éprouvette en position verticale. Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavante.

En descendant le tube laveur dans l'éprouvette, rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante, puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur ; arrêter l'écoulement de la solution lavante. Laisser reposer pendant 20 min  $\pm$  10 s.

Mesurer à l'aide du régllet la hauteur  $h_1$  du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette. Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston. Introduire le régllet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston. Lire la hauteur du sédiment  $h_2$  au niveau de la face supérieure du manchon.

Recommencer les mêmes opérations 3 fois et calculer l'équivalent de sable (ES) moyen.

$$ESV = 100 \times \frac{h_1}{h_2} ; \quad ESP = 100 \times \frac{h_1}{h_2}$$



**Figure 29. Essai Equivalent de sable (NF P 18-597).**

Les résultats de l'équivalent de sable sont donnés dans les tableaux suivants :

Tableau 18. Résultats de l'essai d'équivalent de sable.

Eprouvette	$h_2$	$h_1$	$h_1'$	ESV (%)	ESP (%)
1	12.50	9.70	8.95	77.60	71.70
2	11.95	8.95	8.50	74.89	71.13
3	12.25	9.35	8.15	76.33	66.53
<b>ES moyen (%)</b>				<b>76.27</b>	<b>69.75</b>

Tableau 19. Comparaison des résultats à la norme EN 933-8.

ES		Limite de valeur	Observation
ESV (%)	<b>76.27</b>	$75 \leq \text{ESV} < 85$	<b>Sable légèrement argileux</b>
ESP (%)	<b>69.75</b>	$60 \leq \text{ESP} < 70$	

D'après les normes XP P18-540 et EN 933-8, le sable est légèrement argileux donc on aura recours à l'essai au bleu de méthylène ci-dessous pour confirmer son utilisation dans le béton autoplaçant.

#### I.2.7.2. Essai au bleu de méthylène (méthode à la tâche) NF P 18-592

Préparation de la solution du bleu de méthylène à base de 5g de poudre de bleu dissout dans un litre d'eau distillée ; la solution est portée à 40°C et agitée pendant 3h à vitesse 300 trs/min.

30g du matériau de fraction 0/2 sont trompés dans 100 ml d'eau distillée, l'ensemble est agité pendant 3 min à 400 trs/min.

On injecte successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène dans le bain aqueux contenant la prise d'essai. On contrôle l'adsorption du bleu après chaque ajout, en effectuant une tâche sur un papier filtre.

Pour un simple contrôle de conformité, la quantité de bleu spécifiée est injectée en une seule fois.

Le matériau est injecté, minute par minute, par des doses de 2 ml du bleu de méthylène jusqu'à la saturation des fines argileuses qui est contrôlé par le test à la tâche sur le papier filtre.



D'après la norme **EN 933-9** la valeur de bleu de méthylène, MB, exprimée en grammes de colorant par kilogramme de fraction 0/2 mm est obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$MB = \frac{V_1}{M_1} \times 10.$$

$M_1$  : est la masse de la prise d'essai, en grammes ;

$V_1$  : est le volume total de solution de colorant injectée, en millilitres.

D'après la norme **NF P 94-068**, la valeur au bleu pour le sable de fraction 0/2 :

$$VB = \frac{MB}{100} \times T \text{ (2mm en \%)}$$

T (2mm en %) : tamisât sous le tamis de 2mm, il est exprimé en %.

Les résultats du test au bleu de méthylène sont représentés dans la figure ci- dessous



**Figure 30. Test au bleu de méthylène.**

D'après la figure 30, le dosage du bleu de méthylène est de 4 ml et après avoir effectué cinq tâches (comme l'indique la norme NF P 18-592), on remarque que toutes ces tâches contiennent des rayons sur leurs périphéries cela revient à la saturation des particules argileuses (qui sont présentes dans le sable) par leur absorption au bleu de méthylène.

**Tableau 20. La valeur de bleu pour le sable.**

$V_1$ (ml)	$M_1$ (g)	$MB = (V_1/M_1) \times 10$	T (%)	$VB = (MB/100) \times T(\%)$	Observation
4	30	1.33	65.53	<b>0.88 &lt; 1</b>	<b>Sable propre</b>

D'après la norme XP P 18-540, ( $VB < 1$ ), le sable est non argileux donc on peut l'utiliser dans le béton autoplaçant sans aucune correction.

### I.2.8. Essai Los Angeles NF P 18-573

Tamiser l'échantillon à sec par chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.

Laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.

La masse de l'échantillon pour essai sera de 5000g  $\pm$  5g.

Introduire avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon pour l'essai. La charge est fixée conformément aux indications du tableau ci-après.

**Tableau 21. Nombres de boulets nécessaires pour chaque classe granulaire.**

Classes granulaires (mm)	Nombres de boulets	Masse totale de la charge (g)	
4 - 6.3	7	3080	+20
6.3 - 10	9	3960	à
10 - 14	11	4840	150

Faire effectuer à la machine sous forme de cylindre 500 rotations, à une vitesse régulière comprise entre 30 tr/min.

Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.

Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm, le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.

Laver le refus au tamis de 1.6 mm. Égoutter et sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante. Peser ce refus une fois séché. Soit  $m'$  le résultat de la pesée.

Le coefficient Los Angeles ( $L_A$ ) est, par définition, le rapport :  $100 \times \frac{m}{5000}$

$m = 5000 - m'$ .

$m$  : est la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1.6 mm, en grammes.

Le tableau suivant récapitule les résultats de Los Angeles pour les deux graviers.

**Tableau 22. Los Angeles des graviers étudiés selon la norme XP P 18-540.**

Matériaux	Classes granulaires	Poids			LA = $100 \times \frac{m}{5000}$	Catégorie
		Initial (M)	Final (m')	< 1.6mm m = 5000-m'		
3/8	4 - 6.3	5000	3626	1374	27	LA <sub>A</sub>
8/15	10 - 14	5000	3362	1638	33	LA <sub>B</sub> et LA <sub>C</sub>

D'après la norme XP P 18-540, les graviers étudiés (3/8 et 8/15) ont des résistances acceptables (élevée et moyenne respectivement) donc on peut les utiliser dans notre étude.

### I.2.9. Essai de prise du ciment NF EN 196 -3 (NF P 15 - 473)

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de ciment avec différents taux de substitution d'argile cuite broyée (ACB à : 0, 5, 10, 15 et 20 %).

Le temps de début de prise est déterminé par observation de la pénétration d'une aiguille de 1.13 mm de diamètre et de 300g de masse dans une pâte de ciment au moment où elle atteint une valeur « d » du fond du moule telle que  $d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ .

Le temps de fin de prise est atteint lorsque l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5 mm dans la pâte.

Les résultats de l'essai trouvés à une température de 25°C sont donnés dans le tableau ci-contre.

**Tableau 23. Les constituants des pâtes utilisées et temps de début et de fin de prise.**

Pâtes (% ACB)	Ciment (g)	ACB (g)	Eau (g)	Début de prise (h : mn)	Fin de prise (h : mn)
<b>0</b>	400	0	140	3 : 15	4 : 11
<b>5</b>	380	20	140	3 : 02	4 : 00
<b>10</b>	360	40	140	2 : 50	3 : 52
<b>15</b>	340	60	140	2 : 11	3 : 22
<b>20</b>	320	80	140	1 : 35	2 : 59

D'après les résultats du tableau 23, la pâte du ciment de référence (0 % d'ACB) a un temps de début de prise supérieur et un temps de fin de prise inférieur à ceux donnés par l'annexe A. Cette différence est due à la température et à l'humidité du laboratoire qui diffèrent des conditions normalisées.

Pour les pâtes de ciment avec les taux d'ACB (5, 10, 15 et 20 %), les temps de début de prise et de fin de prise diminuent par rapport à ceux de la pâte de référence. Cette diminution est due à la présence de l'ACB qui consomme l'eau rapidement à cause de sa grande surface spécifique de Blaine (9140 cm<sup>2</sup>/g).

### **I.3. CONCLUSION**

La caractérisation des différents matériaux nous a permis de les utiliser dans les gâchées de béton ; la partie expérimentale suivante nous illustre les différentes formulations de béton autoplaçant réalisées pour obtenir la bonne formulation souhaitée.

## II. ESSAIS DE GACHEES PRELIMINAIRES

En respectant les recommandations de l'AFGC [1] (voir la partie bibliographique) et c'est par tâtonnement qu'on a abouti aux formulations des bétons autoplaçants tout en testant des différents dosages en superplastifiant. Le tableau 24 représente les différentes gâchées réalisées.

On note :

ACB : argile cuite broyée.

BAP (0), BAP (5), BAP (10), BAP (15), BAP (20) : bétons autoplaçants avec des taux de substitution (0, 5, 10, 15 et 20 %) d'argile cuite broyée respectivement.

L : liant (ciment + argile),  $L = 450 \text{ kg/m}^3$ .

F : fines (ciment + argile + filler calcaire),  $F = 500 \text{ kg/m}^3$ .

G : graviers.

S : sable.

C : ciment.

E : eau.

Vpâte : volume de la pâte. La pâte (ciment + argile + filler calcaire + eau + adjuvants + air).

Ac : agent colloïdale ou de viscosité.

Sp : superplastifiant.

**Tableau 24. Les différentes gâchées selon les différents dosages en superplastifiant.**

Dosage en masse (Kg/m <sup>3</sup> )	Formulation 1	Formulation 2	Formulation 3	Formulation 4
Ciment	450	450	450	450
Sable 0/3	715	715	715	715
Gravier 3/8	387	387	387	387
Gravier 8/15	387	387	387	387
Filler calcaire	50	50	50	50
Eau	225	225	225	225
Sp (% C)	<b>1.5</b>	<b>0.5</b>	<b>1</b>	<b>0.7</b>
Air (%)	1.5	1.5	1.5	1.5
G/S	1.08	1.08	1.08	1.08
E/C	0.5	0.5	0.5	0.5
E/F	0.45	0.45	0.45	0.45

Vpâte (l)	395.89	391.68	393.78	392.52
Etallement (cm)	72	50	70	64
Ecoulement	0.64	0.70	0.76	1.11
Stabilité (%)	22	1.2	18.64	13.79
Commentaire	Refusée	Refusée	Refusée	Acceptée

On premier temps on a adopté la formulation 4 car c'est la seule qui satisfait les trois conditions de béton autoplaçant avec un dosage de (0.7 % Ciment) de superplastifiant.

Lors de la substitution d'une partie de ciment par 5 % et 10 % d'ACB (argile cuite broyée), les trois conditions nécessaires pour un béton autoplaçant ne sont pas satisfaites ; le tableau ci-dessous résume les résultats des gâchées réalisées.

**Tableau 25. Les gâchées de béton autoplaçant avec différents pourcentages d'argile cuite broyée.**

Dosage en masse (Kg/m <sup>3</sup> )	BAP (5)	BAP (10)
Ciment	427.5	405
Argile	22.5	45
Sable 0/3	715	715
Gravier 3/8	387	387
Gravier 8/15	387	387
Filler calcaire	50	50
Eau	225	225
Sp (% C)	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>
Air (%)	1.5	1.5
G/S	1.08	1.08
E/C	0.53	0.55
E/F	0.45	0.45
E/L	0.5	0.5
Vpâte (l)	394.48	396.30
Etallement (cm)	58.5	66
Ecoulement	0.74	0.70
Stabilité (%)	5.25	15.50
Commentaire	Refusée	Refusée

D'après le tableau ci-dessus, les conditions nécessaires pour un béton autoplaçant ne sont pas satisfaites au même temps malgré qu'on ait augmenté le dosage en superplastifiant qui a induit deux types de ségrégations : dynamique et statique. C'est à partir de ces inconvénients

qu'on a utilisé un deuxième adjuvant qui est l'agent de viscosité pour assurer la cohésion entre les différents constituants du béton toute en éliminant les ségrégations et avoir un étalement satisfaisant.

Le tableau 26 récapitule les gâchées de béton autoplaçant avec différents pourcentages d'argile cuite broyée, différents dosages en superplastifiant et un dosage fixe de l'agent de viscosité.

**Tableau 26. Les formulations des différents bétons autoplaçants.**

Dosage en masse (Kg/m <sup>3</sup> )	BAP (0)	BAP (5)	BAP (10)	BAP (15)	BAP (20)
Ciment	450	427.5	405	382.5	360
ACB	0	22.5	45	67.5	90
Sable 0/3	715	715	715	715	715
Gravier 3/8	387	387	387	387	387
Gravier 8/15	387	387	387	387	387
Filler calcaire	50	50	50	50	50
Eau	225	225	225	225	225
Sp (% C)	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	<b>0.9</b>	<b>1</b>	<b>1.1</b>
Ac (% C)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Air (%)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
G/S	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
E/C	0.5	0.53	0.56	0.59	0.62
E/F	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
E/L	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Vpâte (l)	393.51	394.90	396.71	398.53	400.35
Etalement (cm)	69.5	60.5	62	64	69
Ecoulement	1.01	0.92	0.98	1	1
Stabilité (%)	14.08	8.25	9.12	9.85	10.90
Formulation	Acceptée	Acceptée	Acceptée	Acceptée	Acceptée

### II.1. Confection des bétons NF P 18-404

Le malaxage des bétons est effectué dans une bétonnière de 120 l de volume. La séquence de malaxage suit les étapes recommandées par [57] telle que :

- Mettre les gros granulats (les graviers) avec 75% de l'eau de gâchage et le filler calcaire puis mélangé pendant une minute et demie ;

- Ajouter au mélange le ciment et malaxer pendant une minute et demie ;
- Verser les granulats fins (le sable + l'agent colloïdal), le superplastifiant dilué dans le reste de l'eau de gâchage (25%) ;
- Mélanger l'ensemble pendant cinq minutes ;
- Laisser reposer trois minutes ;
- Malaxer pendant cinq minutes ;

Après que la confection soit terminée, les échantillons sont mis en place dans leurs moules, soient des cylindres de 16cm×32cm et des prismes de 10cm×10cm×50cm.

Après démoulage, la conservation des éprouvettes cylindriques se fait dans un bac d'eau et les prismes dans une armoire.

## II.2. Essai sur bétons à l'état frais

On a illustré dans la partie bibliographique les trois caractéristiques à l'état frais qu'un béton autoplaçant doit satisfaire telle que (l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à la boîte en L et la stabilité au tamis).

### II.2.1. Masse volumique des bétons frais NF P 18-440

Le béton frais est mis en place dans un récipient rigide et étanche à l'eau, soient  $m_1$  sa masse,  $V$  son volume. Le béton dans le récipient est ensuite pesé, soit  $m_2$  sa masse.

La masse volumique du béton frais est donnée par la relation :  $\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}$

**Tableau 27. Les masses volumiques fraîches des BAP.**

BAP (ACB %)	BAP (0)	BAP (5)	BAP (10)	BAP (15)	BAP (20)
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2338.53	2334.07	2276.00	2263.73	2268.53

### II.2.2. Essai de consistance

On utilise le cône d'Abrams pour estimer la consistance de nos bétons ; puisque les affaissements de ces bétons autoplaçant sont complets, on mesure le diamètre moyen de la galette d'étalement (prendre deux mesures à angle droit et puis on fait la moyenne). Voir la figure 31.

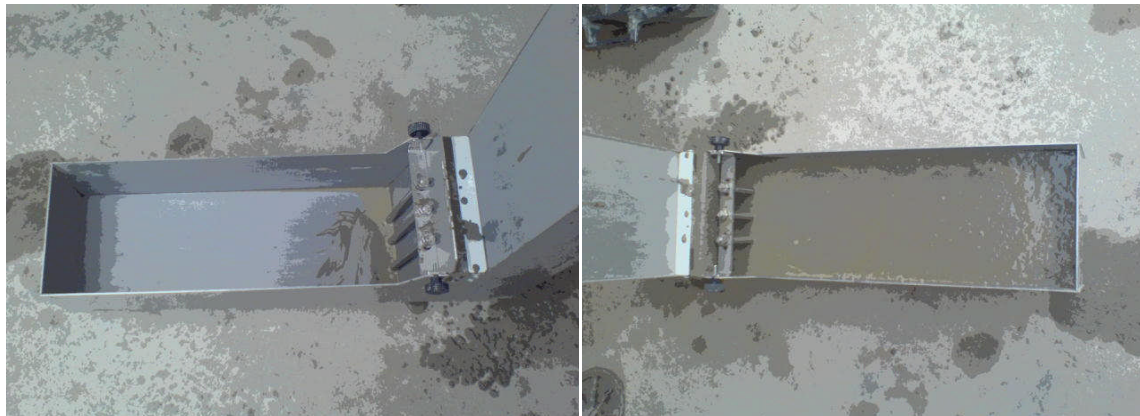




**Figure 31. Essai d'étalement des bétons autoplaçants.**

### II.2.3. Essai de ségrégation dynamique

A l'aide de la boîte en L on estime les résistances à la ségrégation dynamique de nos bétons. L'écoulement des bétons dans la partie horizontale de la boîte munie de trois barres d'acier est montré dans la figure 32. Les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  de chaque béton sont mesurées et les rapports  $H_2/H_1$  sont calculés.

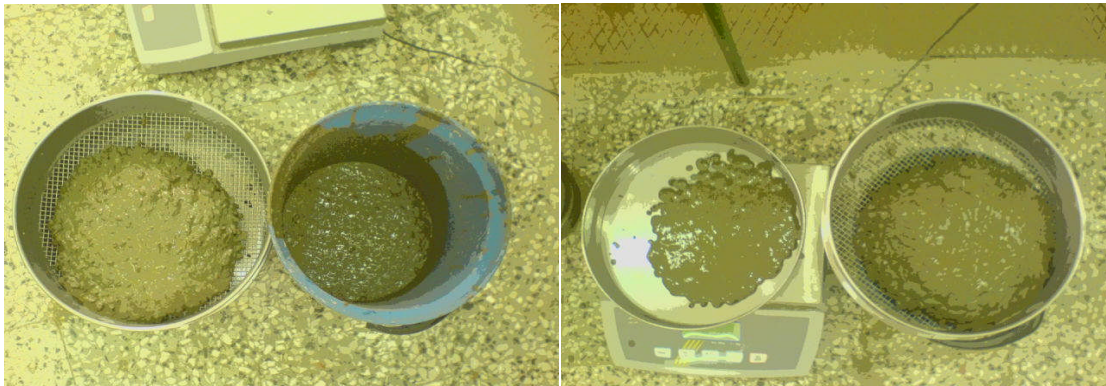


**Figure 32. Essai de la boîte en L.**

### II.2.4. Essai de ségrégation statique

La résistance des bétons frais à la ségrégation statique est effectuée par l'essai au tamis représenté par la figure 33.

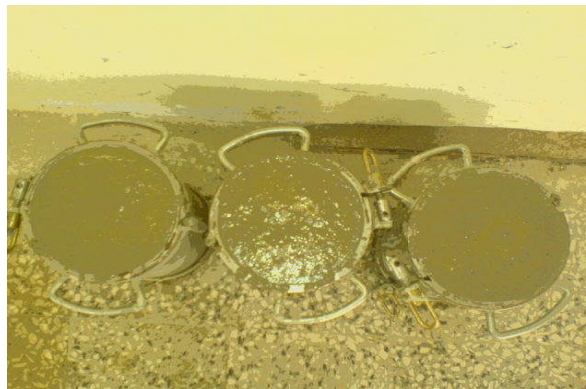
Cet essai permet de calculer le taux de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non.



**Figure 33. Essai de stabilité au tamis.**

### II.2.5. Le ressuage

A partir de La figure 34 on estime le ressuage visuellement et on remarque qu'il n'est y a pas de l'eau à la surface des éprouvettes donc pas de phénomène de ressuage.



**Figure 34. Vérification du ressuage (visuellement) du béton autoplaçant à l'état frais.**

## II.3. Essais sur bétons à l'état durci

### II.3.1.A. Masse volumique humide NF P 18-435

Les éprouvettes cylindriques de béton après démoulage à 24 heures, sont conservées dans un bac d'eau. A chaque âge de mesure, on tire les éprouvettes du bac, on éponge et assèche leurs faces et on prend leurs masses  $M$ .

$V$  est le volume de l'éprouvette cylindrique de dimension  $16 \times 32 \text{ cm}^2$ .

La masse volumique humide du béton est donnée par la relation :  $\rho_h = \frac{M}{V}$ . Voir l'annexe D.

Le résumé des résultats de calcul est illustré sur le tableau ci-dessous :

**Tableau 28. Evaluation des masses volumiques humides des bétons.**

Masse volumique humide (Kg/m <sup>3</sup> )	BAP (0)	BAP (5)	BAP (10)	BAP (15)	BAP (20)
1 jour	2245.30	2257.00	2249.00	2263.30	2272.70
7 jours	2265.60	2276.30	2270.00	2282.30	2291.30
14 jours	2267.00	2279.30	2272.00	2283.70	2291.30
21 jours	2268.60	2280.30	2273.00	2286.00	2294.00
28 jours	2268.00	2282.30	2274.00	2287.00	2294.30
2 mois	2273.00	2285.00	2276.00	2289.00	2298.30
3 mois	2276.00	2287.60	2278.00	2292.00	2300.30
4 mois	2278.60	2292.00	2281.60	2295.00	2303.00
5 mois	2279.30	2292.30	2283.00	2295.70	2303.30
6 mois	2281.67	2293.33	2283.66	2297.33	2305.33

### II.3.1.B. Comparaison entre la densité sèche théorique et la densité sèche expérimentale à 28 jours

#### B1. Densité sèche théorique

La densité sèche théorique est donnée par :  $\rho_{s.th} = [1.2 \cdot C + g]/1000$  ; telle que:

C : teneur en ciment en Kg/m<sup>3</sup>.

g : teneur sèche en granulats avec ajouts en Kg/m<sup>3</sup>.

Le facteur 1.2 = 100 % de la teneur en ciment + 20 % de la masse du ciment liée chimiquement.

Le tableau suivant nous donne la densité sèche théorique pour chaque type de béton autoplaçant :

**Tableau 29. Densité sèche pour chaque type de BAP.**

Constituants	BAP (0)	BAP (5)	BAP (10)	BAP (15)	BAP (20)
C Kg/m <sup>3</sup>	450	427.5	405	382.5	360
g Kg/m <sup>3</sup>	1539	1561.5	1584	1606.5	1629
$\rho_{s.th}$	2.078	2.074	2.070	2.065	2.061

**B2. Densité sèche expérimentale NF P 94-050 et NF P 94-064**

La densité sèche expérimentale est donnée par :  $\rho_s = \gamma_h / (1 + w)$  ;

$w = (M_h - M_s) / M_s$  ;  $\gamma_h = P_h / V$  ; telle que :

$\gamma_h$  : densité volumique humide de l'éprouvette cylindrique.

$P_h$  : masse moyenne humide de l'éprouvette en g.

$V$  : volume en  $\text{cm}^3$  de l'éprouvette cylindrique de dimension  $16 \times 32 \text{ cm}^2$ .

$W$  : teneur en eau en pourcentage (%).

$M_h$  : masse moyenne humide des échantillons après écrasement des éprouvettes du béton.

$M_s$  : masse moyenne sèche des échantillons après leurs étuvages à  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Pour l'exemple de calcul voir le tableau :

**Tableau 30. Calcul de la densité sèche expérimentale pour le BAP (0) à 28 jours.**

Epvttte	ech	Mh (g)	Ms(g)	w (%)	P <sub>h</sub> (g)	V (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_h$	$\rho_s$	$\rho_s$ moy	$\rho_s$ Moy		
1	1	709	666	6.45	15050	6430.72	2.34	2.19	2.17	2.15		
	2	543	506	7.31	15050	6430.72	2.34	2.18				
	3	519	478	8.57	15050	6430.72	2.34	2.15				
2	1	190	178	6.74	14994	6430.72	2.33	2.18	2.14		2.15	
	2	440	390	10.55	14994	6430.72	2.33	2.11				
	3	126	116	8.62	14994	6430.72	2.33	2.14				
3	1	402	378	6.35	15090	6430.72	2.34	2.20	2.15			2.15
	2	181	164	10.36	15090	6430.72	2.34	2.12				
	3	285	262	9.56	15090	6430.72	2.34	2.13				

Telle que : Epvttte : éprouvette.

$\rho_s$  moy : densité sèche moyenne de chaque éprouvette.

$\rho_s$  Moy : densité sèche moyenne pour toutes les éprouvettes.

On effectue le même calcul pour chaque type de béton et on donne le tableau de comparaison suivant :

**Tableau 31. Comparaison entre les densités sèches théoriques et expérimentales pour chaque type de BAP.**

Type de béton	Densité sèche théorique $\rho_{s,th}$	Densité sèche expérimentale $\rho_s$
<b>BAP (0)</b>	2.078	2.150
<b>BAP (5)</b>	2.074	2.086
<b>BAP (10)</b>	2.070	2.045
<b>BAP (15)</b>	2.065	2.065
<b>BAP (20)</b>	2.061	2.091

D'après le tableau ci-dessus, on remarque une légère différence des valeurs de densités expérimentales par rapport aux densités théoriques, cela est dû à l'eau liée chimiquement ou à la présence de l'air dans les pores des BAP. Si non les deux densités sont proches les unes des autres cela signifie que les bétons confectionnés sont homogènes.

### **II.3.2. Essai de compression NF P 18-406 et NF P 18-455**

La propriété principale de béton durci est la résistance à la compression. Pour pouvoir évaluer la résistance à la compression, on doit avoir la valeur moyenne des trois éprouvettes au moins, dont les différences entre elles doivent être inférieures à 15%.

Afin de vérifier la résistance à la compression nous avons utilisés des éprouvettes cylindriques ( $16 \times 32$ ) cm<sup>2</sup> pour les essais de compression à : 7, 28, 90 et 180 jours (Voir l'annexe E). Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après le coulage et conservées sous l'eau à la température ambiante. L'essai de compression simple est réalisé selon la norme NF P 18-455 à l'aide d'une presse hydraulique. Voir les figures 35 et 36.





Figure 35. Essai d'écrasement d'une éprouvette de BAP(15) à l'âge de 7 jours.



Figure 36. Les trois morceaux obtenus après l'écrasement des trois éprouvettes de BAP(15) à l'âge de 7 jours.

Les deux figures 35 et 36 montrent que les ruptures des trois éprouvettes sont correctes selon les schémas de ruptures donnés par la norme NF P 18-455.

Les résultats de la résistance à la compression sont donnés sur le tableau suivant :

Tableau 32. Résistances à la compression des bétons autoplaçants.

Résistances à la compression (MPa)	BAP (0)	BAP (5)	BAP (10)	BAP (15)	BAP (20)
7 jours	30.25	20.03	23.55	21.72	18.97
28 jours	38.23	31.18	30.65	28.86	28.89
90 jours	45.77	43.78	43.96	38.65	36.49
180 jours	48.12	46.08	46.85	42.29	39.97

### II.3.3. Retrait de dessiccation des bétons

Le retrait de dessiccation ou retrait de séchage par définition se traduit par un départ d'eau inhérent à l'équilibre hydrique du matériau avec l'atmosphère ambiante non saturée et ce dès la mise en place du béton. Il possède une amplitude très importante devant les autres retraits (thermique et endogène) [50].

Pour mesurer le retrait de séchage (dessiccation) nous avons utilisés des prismes de béton (10×10×50) cm<sup>3</sup>. Les prismes de BAP ont été démoulés 24 heures après le coulage et conservés dans une enceinte (étanche). Nous avons noté les variations dimensionnelles de ces prismes à l'âge de : 0, 1, 7, 14, 21, 28, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 et 270 jours tout en notant la variation de température à chaque âge de mesure (T = 13 à 28°C). Les résultats de retrait de dessiccation sont donnés par le tableau 33.

#### - Mesure des variations des longueurs, voir l'annexe F

La variation relative de longueur est généralement désignée par  $\varepsilon(t)$  :  $\varepsilon(t) = \frac{dl}{L}$

**L** : la longueur de base prise égale à 500 mm (longueur initiale de l'éprouvette prismatique).

**l** : la valeur lue sur le comparateur au temps t.

dl : variation de la longueur telle que : dl = L - l.

Le résumé des résultats de calcul sont illustrés sur le tableau ci-dessous :

Tableau 33. Retraits de dessiccation des prismes des bétons autoplaçants.

Retrait de dessiccation (mm/m) ou $\varepsilon(t)$	BAP (0)	BAP (5)	BAP (10)	BAP (15)	BAP (20)
0 jour	0	0	0	0	0
1 jour	0.065	0.109	0.114	0.108	0.108
7 jours	0.072	0.113	0.116	0.089	0.090
14 jours	0.074	0.101	0.103	0.096	0.102
21 jours	0.079	0.091	0.110	0.101	0.114
28 jours	0.086	0.106	0.116	0.112	0.136
60 jours	0.093	0.116	0.122	0.121	0.132
90 jours	0.096	0.133	0.118	0.124	0.144
120 jours	0.107	0.125	0.131	0.130	0.142
150 jours	0.117	0.165	0.131	0.137	0.160
180 jours	0.134	0.147	0.164	0.157	0.150
210 jours	0.132	0.173	0.179	0.157	0.182
240 jours	0.134	0.162	0.153	0.160	0.160
270 jours	0.134	0.164	0.152	0.166	0.178



### III.1. ESSAIS SUR BETONS FRAIS

#### III.1.1. Masse volumique fraîche des BAP

D'après la figure 37, on constate que le béton autoplaçant de référence possède une masse volumique fraîche élevée par rapport aux autres bétons autoplaçants avec substitution. Cela revient à l'écart de densité du ciment et celle de l'argile cuite et broyée (3.1 et 2.60 respectivement).

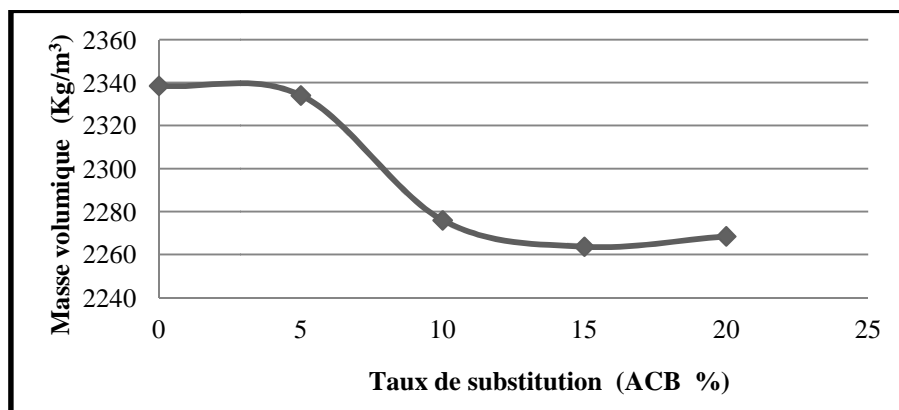


Figure 37. Masses volumiques des bétons autoplaçants à l'état frais.

#### III.1.2. Etalement, écoulement et laitance

Les figures 38, 39, 40 suivantes montrent les valeurs de : l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à la boîte en L et la stabilité au tamis respectivement.

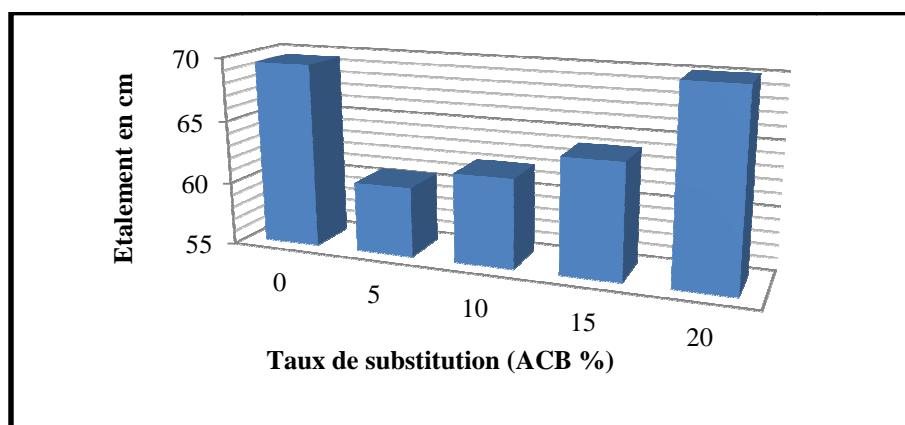
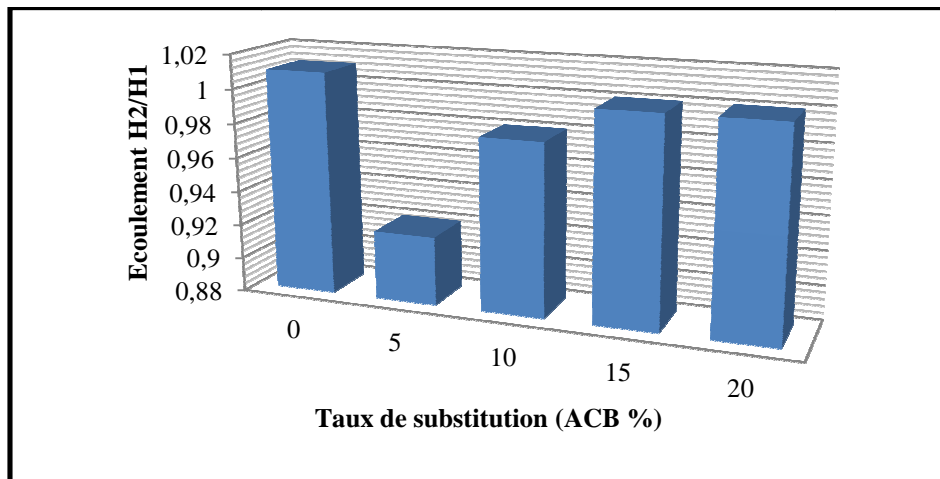


Figure 38. Essai d'étalement des bétons autoplaçants.

L'étalement d'un béton autoplaçant peut varier entre (60 et 75) cm selon [1]. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 38, montrent que tous les bétons ont des valeurs d'étalement situées à l'intérieur du domaine des BAP.

La substitution d'une partie de ciment par des taux d'argile cuite broyée (0, 5, 10, 15 et 20 %) a une influence sur la demande en dosage en superplastifiant [10], [40],  $Sp = 0.8\%$  pour les BAP (0 et 5 % ACB) telle que on remarque une diminution de l'étalement pour le BAP (5) à cause de la présence de l'argile cuite broyée qui présente une finesse grande par rapport à celle du ciment (voir la figure 27) et par conséquent elle demande plus de l'eau pour assurer la réaction pouzzolanique. L'augmentation du taux de substitution engendre l'augmentation du superplastifiant [56] ainsi que l'augmentation de l'étalement.



**Figure 39. Essai de la boîte en L des bétons autoplaçants.**

L'écoulement du béton autoplaçant se caractérise par  $(H_2/H_1)$  qui est supérieur ou égal à (0.8) selon [1]. Les résultats de l'écoulement présentés sur la figure 39 s'inscrivent dans le domaine des BAP (pas de ségrégation dynamique pour tous les bétons). On remarque l'augmentation de la valeur de l'écoulement avec l'augmentation du taux de substitution de l'argile cuite broyée et du dosage en Sp, sauf pour le BAP (5) avec Sp (0.8 %) qui subi une diminution de l'écoulement à cause de la présence de l'ACB qui absorbe plus de l'eau et rend le béton plus visqueux et que le dosage en Sp n'a pas changé (même dosage avec BAP (0)).

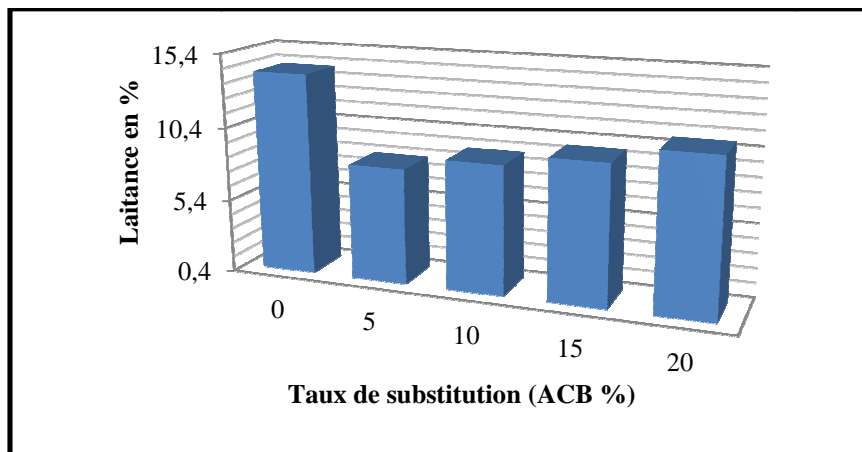


Figure 40. Essai de stabilité au tamis des bétons autoplaçants.

La stabilité du béton autoplaçant se caractérise par la laitance (P %) qui est inférieure à 15 % selon [1]. Les résultats de la laitance de la figure 40 entrent dans le domaine des BAP. On constate une laitance proche de la laitance critique pour le BAP (0) puis une diminution de la laitance pour le BAP (5) à cause de la présence de l'argile cuite broyée qui rend la pâte plus épaisse avec le dosage 0.8 % de Sp. On remarque aussi l'augmentation de la laitance avec l'augmentation des taux de substitution d'ACB et de dosage en Sp.

## III.2. ESSAIS SUR BETONS DURCIS

### III.2.1. Masses volumiques humides des BAP

Les masses volumiques humides des bétons durcis sont présentées sur la figure ci-dessous :

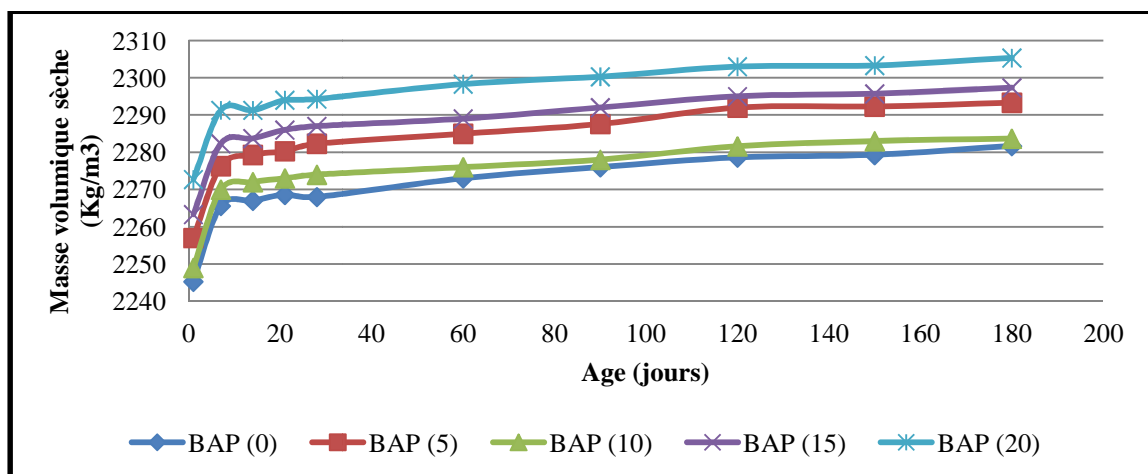


Figure 41. Masses volumiques humides des bétons autoplaçants.

La figure 41 montre que les masses volumiques humides des différents BAP augmentent en fonction du temps (1, 7, 14, 21, 28, 60, 90, 120, 150 et 180 jours). Cela s'explique par l'hydratation continue de ciment qui ne s'arrête jamais, sachant que les éprouvettes des BAP sont conservées dans l'eau juste après leur démoulage à 24 heures.

Le BAP (0) de référence possède une courbe de masse volumique inférieure à celles des autres BAP (avec les différents taux d'ACB). Cela s'explique par l'absorption du BAP (0) une petite quantité d'eau afin d'assurer la réaction d'hydratation du ciment.

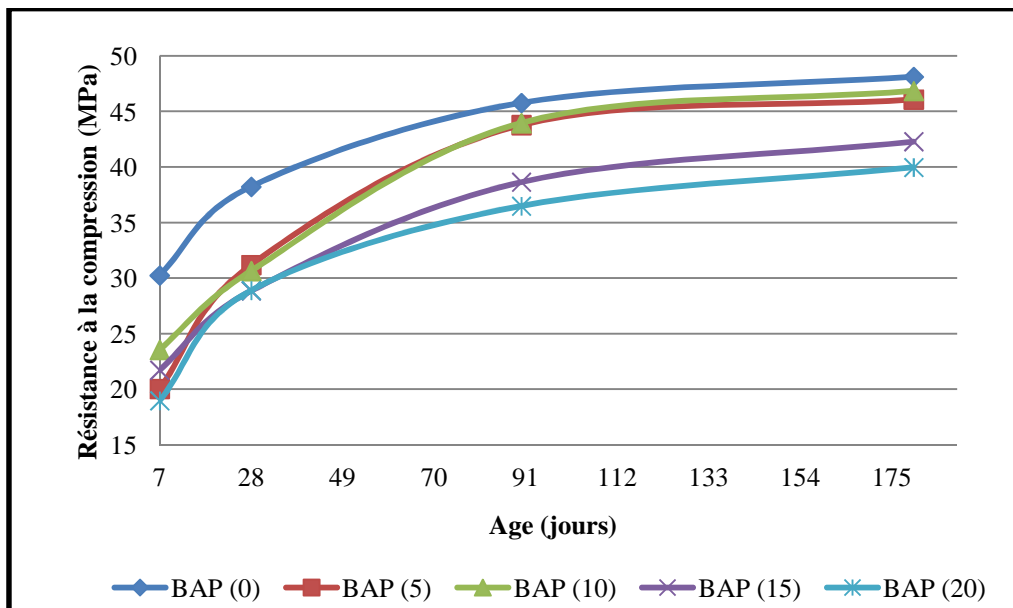
Alors que les masses volumiques des BAP avec substitution, augmentent avec l'augmentation du taux d'ACB ; cela s'explique par l'augmentation de l'absorption de quantités importantes d'eau par ces BAP pour qu'ils assurent la réaction d'hydratation du ciment ainsi que la réaction pouzzolanique de l'argile cuite broyée.

Sauf que les masses volumiques du BAP (5) dépasse celle du BAP (10) ; car le BAP (5) contient le même dosage que le BAP (0) soit en  $Sp = 0,8 \%$  ou en  $(E/F) = 0,45$  alors que le BAP (10) a un :  $Sp = 0,9 \%$  et  $(E/F) = 0,45$  ; donc le BAP (5) a absorbé une quantité d'eau importante afin d'assurer les deux réactions (hydratation et pouzzolanique).

### III.2.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton et en béton armé. Le béton est caractérisé par la résistance à la compression  $R_{c28}$  mesurée sur des éprouvettes écrasées à 28 jours selon la norme NF EN 12390-3.

La figure 42 nous montre que le béton de référence possède des résistances à la compression plus élevés par rapport aux bétons avec des taux de substitution de l'argile cuite broyée, pendant (7, 28, 90 et 180 jours).



**Figure 42. Evolution de la résistance à la compression des BAP.**

La résistance à la compression est inversement proportionnelle avec les taux d'ACB. Car, plus le pourcentage de remplacement du ciment par le matériau pouzzolanique est grand, plus les résistances des bétons ainsi obtenus prennent du temps pour rattraper celles du béton qui ne contient pas d'ajouts selon les auteurs cités en [61].

D'après De Larrard et Pera, l'utilisation du filler calcaire dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges. Lorsque les particules fines du filler sont bien défloculées par les superplastifiants ; elles favorisent l'hydratation du ciment par un effet chimique. Comme elles conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense par un effet physique. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite [11].

Les deux bétons, BAP (5) et BAP (10) ont des résistances très proches les unes des autres mais elles sont inférieures à celles de BAP (0) aux âges (7 et 28 jours), cela pourrait s'expliquer par la lenteur de la réaction pouzzolanique à court terme [19]; les deux bétons (BAP (5) et BAP (10)) atteignent les valeurs : (43,78 et 43,96 MPa) et (46,08 et 46,85 MPa) pour les âges 90 et 180 jours respectivement, ces résistances sont augmentées à long terme [19], elles se rapprochent de celle de BAP (0) avec 2 MPa de différence.

Les deux bétons, BAP (15) et BAP (20) ont des résistances qui se rapprochent les unes des autres avec 2 MPa de différence quelques fois, bien que ces résistances sont inférieures à celles des BAP (5) et BAP (10).

Les résultats de la littérature confirment nos résultats de recherche telle que :

- Les BAP qui ont un rapport E/C bas, ont de bonnes résistances mécaniques [11].
- D'après Domone, la résistance tend à être régie par le type et la proportion d'addition de poudre que par le rapport E/P [11].
- D'après Assié [4] et De Larrard [23], la classification de la résistance à la compression est liée au type d'utilisation du béton à savoir :
  - une résistance faible, prévue aux alentours de 20 MPa pour les bétons de bâtiment ;
  - une résistance moyenne, proche de 40 MPa pour les bétons d'ouvrage ;
  - une résistance élevée, supérieur à 60 MPa propre aux bétons à haute performance.

On conclue que les résistances à la compression de notre recherche sont **moyennes** selon Assié [4] et De Larrard [23].

- La meilleure résistance obtenue après celle du béton autoplaçant de référence est 46,85 MPa (à six mois) pour le BAP avec 10 % d'ACB. Cela s'explique par la contribution de la pouzzolane dans l'évolution de la résistance à la compression par la réaction pouzzolanique ; la masse de chaux libre produite durant l'hydratation du ciment peut à son tour donner des C-S-H supplémentaires en se combinant en présence d'eau avec la silice disponible provenant de la pouzzolane [62].

### III.2.3. Retrait de dessiccation

Rappelons que le retrait de dessiccation est lié à la migration de l'eau à l'intérieur du matériau qui est en déséquilibre hydrique avec le milieu extérieur. Ce départ d'eau entraîne peu ou pas de retrait dans un premier temps car il s'agit d'eau libre ou contenue dans des pores de grande dimension. En revanche, lorsque le séchage continue, l'eau qui s'évapore est plus fortement liée (physiquement ou chimiquement) aux autres constituants de la matrice cimentaire (hydrates en particulier) et va donc générer une contraction du matériau [4].

D'après les figures 43, 44, 45, 46 et 47 ci-dessous ; les retraits de dessiccation des différents bétons autoplaçants sont croissants dans le temps (de 1 à 270 jours) bien que le béton de référence possède une courbe légèrement inférieure à celles des autres bétons autoplaçants avec ajouts. Ces derniers ont des courbes de retrait d'allures qui se rapprochent ; temps en temps on remarque une augmentation et temps en temps une diminution des retraits jusqu'à l'âge de 28 jours (ce phénomène est beaucoup plus remarquable pour le BAP (5) même après 28 jours, voir le tableau 33); ces variations du retrait sont dues aux variations de la température dans l'enceinte ( $T = 13$  à  $28$  °C). Voir les figures ci-après :

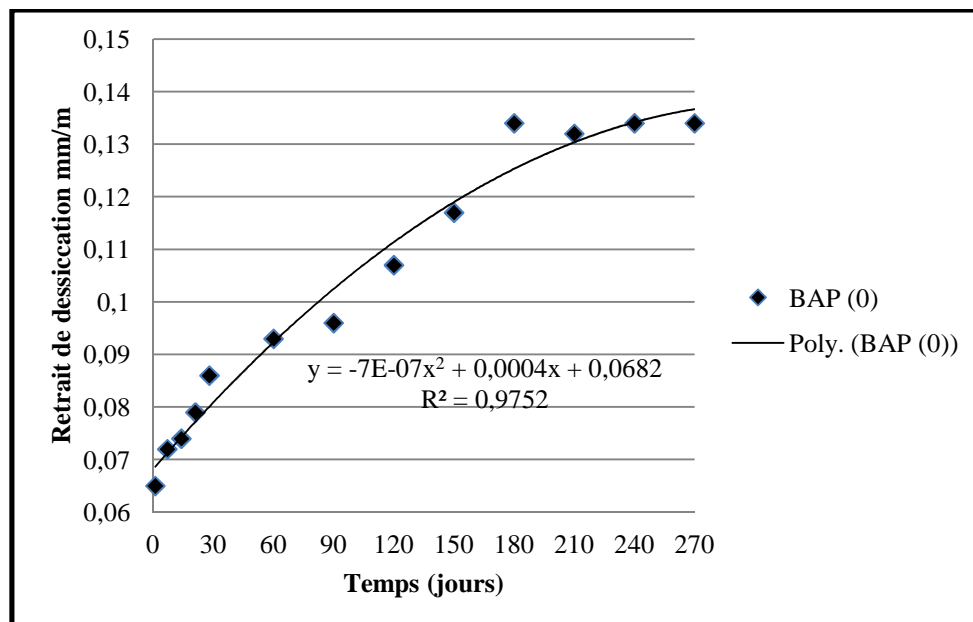


Figure 43. Retrait de dessiccation du BAP (0).

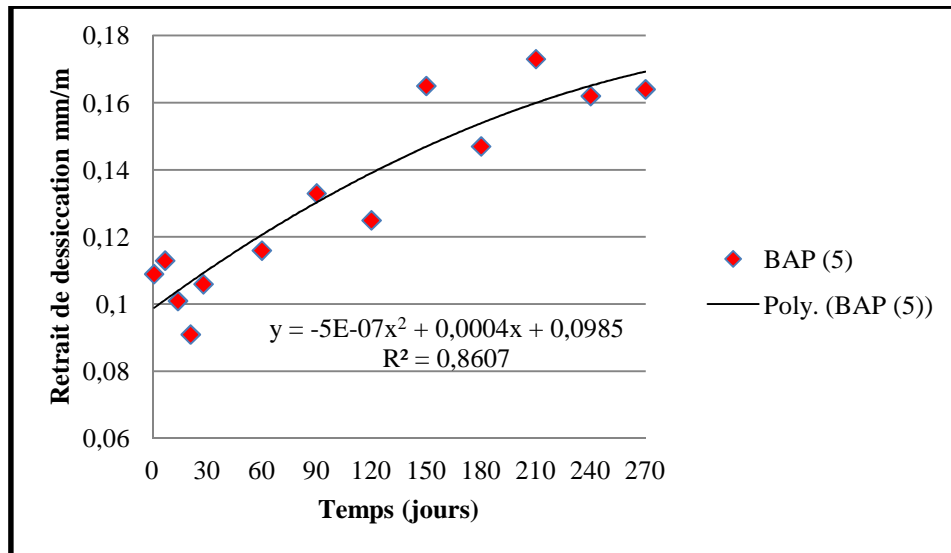


Figure 44. Retrait de dessiccation du BAP (5).

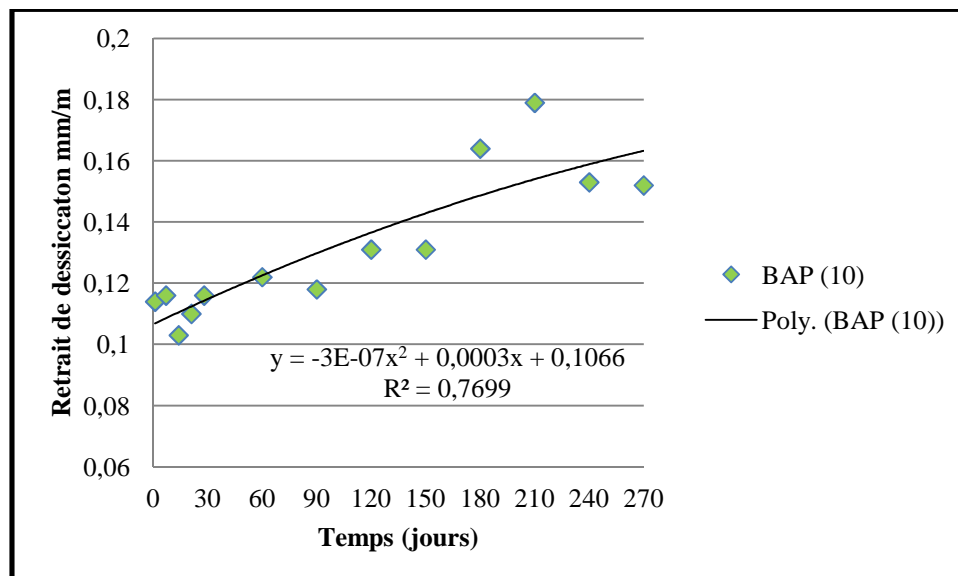


Figure 45. Retrait de dessiccation du BAP (10).



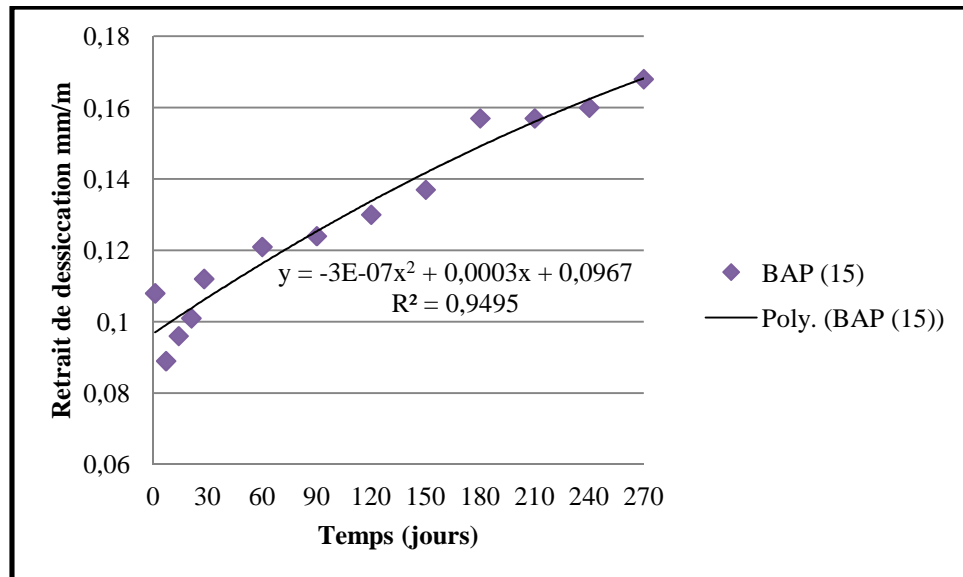


Figure 46. Retrait de dessiccation du BAP (15).

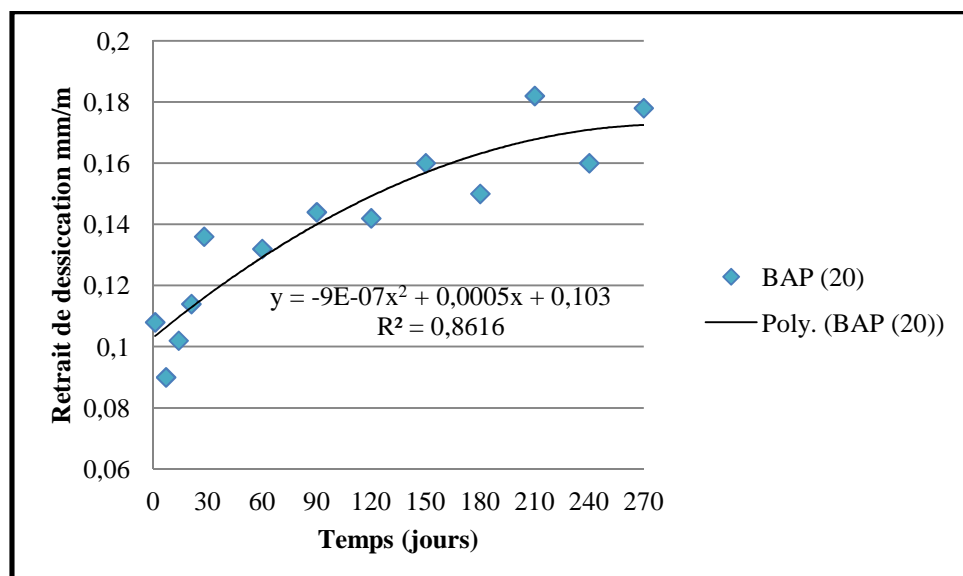
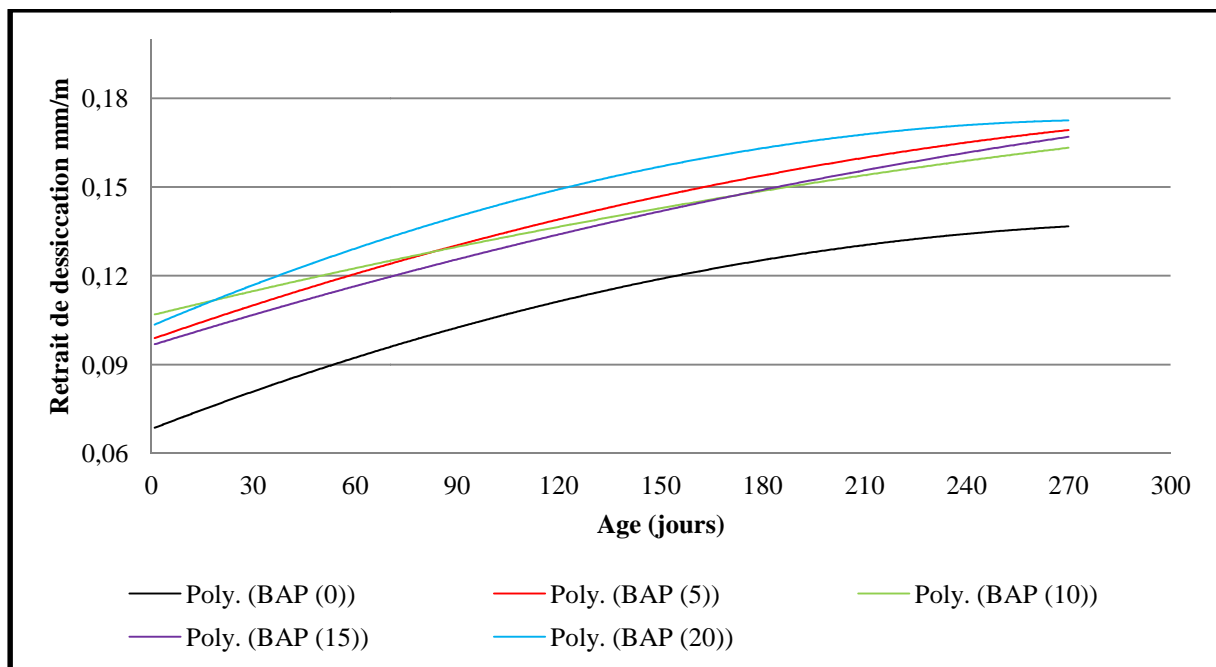


Figure 47. Retrait de dessiccation du BAP (20).

Les valeurs des retraits des bétons autoplaçants (BAP (5), BAP (10), BAP (15) et BAP (20)) se rapprochent les unes des autres et tendent même à se stabiliser vers l'âge de 180 jours (voir le tableau 33) puis au-delà de cet âge on remarque une légère augmentation des retraits des bétons, cette augmentation s'explique par l'utilisation d'une quantité d'eau importante par ces BAP car l'ajout de l'argile cuite broyée qui possède une structure complexe et une surface spécifique de Blaine importante ( $9140 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) [25] consomme et demande plus de l'eau, en plus de ça il ya évaporation de l'eau vers le milieu ambiant quand l'humidité relative est moindre [4].

La figure 48 englobe les courbes des retraits de dessiccation des cinq bétons autoplaçants.



**Figure 48. Retraits de dessiccation des différents BAP.**

D'après [11], les paramètres influençant sur le retrait de dessiccation sont :

- Rapport E/C : le rapport E/C a des effets contradictoires sur le retrait. Les réactions d'hydratation ont un besoin en eau limité (environ 0,25). On considère qu'au dessus de 0,4, l'hydratation n'occasionne pas de forte baisse d'humidité relative, donc pas de retrait important. Ces résultats sont contradictoires avec les résultats de notre recherche, telle que le retrait de dessiccation est proportionnel avec le rapport E/C (quand E/C augmente, le retrait de dessiccation augmente aussi).

- Le volume de pâte : le retrait est une fonction croissante du volume de pâte, parce que les granulats ne connaissent pas de retrait. Le volume de pâte est un paramètre majeur contrôlant le retrait du béton. Son influence est plus grande que le rapport E/C. Ces données confirment nos résultats (l'augmentation du volume de pâte induit l'augmentation du retrait de dessiccation).

- Effet du filler calcaire : D'après Van [4], le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée selon Hasni. Ces résultats correspondent avec nos résultats de recherche, car le filler calcaire qui est présent dans les cinq formulations de notre béton autoplaçant, a un effet positif (retrait minime) que pour le BAP de référence (sans ajouts d'ACB).

- Effet des adjuvants : les résultats du retrait divergent. Pour certains, ils n'ont pas d'effet sur le retrait, ce qui est à priori paradoxal. A l'opposé, ces adjuvants semblent augmenter le retrait, par augmentation de la diffusivité du matériau. On constate que nos résultats confirment l'effet négatif de l'augmentation du dosage du superplastifiant sur le retrait.

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante d'après Persson [11]. Et que l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700  $\mu\text{m}$  à 180 jours (c'est à cet âge que les retraits se stabilisent en général). Alors que nos BAP (5) et BAP(10) qui ont des résistances proches, ont des valeurs de retrait de l'ordre de (147 et 164  $\mu\text{m}$  respectivement à 180 jours) très différentes de celles citées par [11] ; bien que les BAP avec ajout sont encore en variation au delà de 180 jours.

A l'âge de neuf mois, les retraits des BAP (0, 5 et 10 % d'ACB) sont stables ; par contre les autres BAP restent en variation, cela revient à leurs quantité d'ACB importantes ce qui veut dire la quantité d'eau adsorbée importante ce qui induit plus de temps pour que cette eau s'évapore et que les retraits de ces BAP se stabilisent.

D'après les résultats [18], les retraits de dessiccation des mortiers sont beaucoup plus importants que ceux des bétons autoplaçants. La valeur du retrait de dessiccation des mortiers est de l'ordre de 500  $\mu\text{m}$  alors que celle de nos BAP est moins significative (la plus grande valeur est de l'ordre de 178  $\mu\text{m}$ ), cela s'explique par la présence des gros granulats (graviers

3/8 et 8/15) dans les BAP et leurs absence dans les mortiers, telle que les graviers retiennent les retraits de la pâte du ciment [42].

En général, l'incorporation des additions minérales dans la composition du béton entraîne une demande en eau supplémentaire, ceci est due à la présence des fines de surface spécifique importante ce qui induit un volume de pâte important et une formation supplémentaire de produits CSH et CAH (formés par la réaction pouzzolanique), ce qui engendre un retrait plus important [34]. D'après Nivelles [13], lors de l'hydratation du ciment, une partie du volume n'est pas rempli par les hydrates, cela correspond aux pores capillaires. Ces pores capillaires sont réduits en dimension et en quantité en raison de la formation des hydrates (CSH et CAH).

- La petite valeur du retrait de dessiccation est de l'ordre de 152  $\mu\text{m}$  pour le BAP avec 10 % d'ACB; elle est plus proche de la valeur du retrait du béton de référence à 134  $\mu\text{m}$  (à neuf mois).

- Aucune fissure n'a été signalée à vu d'œil pour tout les BAP, même pour le BAP (15) avec un retrait de dessiccation de 178  $\mu\text{m}$  à neuf mois. Cela prouve que l'apport de l'ACB est bénéfique pour les bétons autoplaçants.

## CONCLUSION GENERALE

---

La lecture de la littérature nous a permis de se familiariser avec le béton autoplaçant qui présente de nombreux avantages tels que la mécanisation de la production, de l'exécution sur chantier, l'amélioration des conditions environnementales, etc. Ces avantages doivent faire du BAP le matériau d'avenir dans le bâtiment et les travaux publics.

Le sujet de notre recherche s'est articulé autour de la formulation et les propriétés des bétons autoplaçants confectionnés à partir d'une gamme de constituants disponibles localement (wilaya de Bejaia : l'argile provenant d'un gisement d'Oued Remila et le calcaire issu du ponçage de carrelage).

En se basant sur les recommandations de l'AFGC et sur les essais expérimentaux (variation du dosage de l'argile cuite et broyée et du superplastifiant), on a abouti à formuler cinq bétons autoplaçants qui satisfirent en premier lieu les caractéristiques du BAP à l'état frais (l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à la boîte en L et la stabilité au tamis), puis on a constaté que les caractéristiques de ces BAP sont avérées satisfaites à l'état durci aussi.

La caractérisation des BAP de notre recherche nous a permis de conclure que :

- La masse volumique fraîche est inversement proportionnelle avec l'augmentation du taux de l'argile cuite broyée.
- L'augmentation du taux de substitution d'ACB engendre l'augmentation du superplastifiant ainsi que l'augmentation de : l'étalement, l'écoulement et la laitance (sans dépasser les valeurs de l'AFGC).
- La masse volumique humide augmente avec l'augmentation du taux d'ACB, ce qui induit l'augmentation de l'absorption de l'eau pour assurer les réactions d'hydratation et pouzzolanique.
- Les résistances à la compression des BAP sont moyennes, on peut utiliser ces BAP pour la construction des bâtiments ou des ouvrages d'art.
- La meilleure résistance obtenue après celle du béton autoplaçant de référence est 46,85 MPa (à six mois) pour le BAP avec 10 % d'ACB.
- Les retraits de dessiccation des BAP sont minimes ; à six mois, la plus grande valeur est 164  $\mu\text{m}$  contre les valeurs de 550 à 700  $\mu\text{m}$  pour les retraits issues de la littérature [11].

## CONCLUSION GENERALE

---

- La petite valeur du retrait de dessiccation est de l'ordre de 152  $\mu\text{m}$  pour le BAP avec 10 % d'ACB; elle est plus proche de la valeur du retrait du béton de référence 134  $\mu\text{m}$  (à neuf mois).
- La récupération des filler calcaire (déchet issu du ponçage du carrelage) a aussi un effet écologique et permet sa valorisation.
- L'utilisation du filler calcaire avec un diamètre de 63  $\mu\text{m}$  contribue à l'arrangement de l'empilement granulaire et améliore la résistance à la compression dans les bétons autoplacants.
- Le remplacement d'une partie de ciment par l'ACB a un impact :
  - Ecologique, cela se traduit par la réduction de l'émission de  $\text{CO}_2$  (car la fabrication d'une tonne de ciment engendre un dégagement de la même valeur de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère).
  - Economique, telle que l'énergie de cuisson de l'argile est de 750°C alors que celle du ciment est de 1450°C.
  - Technique, par l'effet de remplissage (rendre le béton plus compact) tout en améliorant les caractéristiques du BAP.

### Perspectives de la recherche

- Etude de l'effet de l'attaque sulfatique et l'action de  $\text{CO}_2$  sur les bétons autoplacants avec les différents ajouts d'argile cuite broyée.
- Etude rhéologique sur l'action de l'ACB dans les matrices cimentaires et répondre à la question : est ce que le taux de substitution de 10 % confirme l'évolution de la résistance à la compression et le retrait de dessiccation en comparant avec les différents taux déjà utilisés ?
- Substitution d'une partie du ciment par le filler calcaire à différents taux d'ajout (0, 5, 10, 15 et 20 %) et fixation du taux d'ajout d'ACB à 50  $\text{Kg/m}^3$  dans le BAP.
- Bien que la présence des graviers dans un béton améliore la résistance à la compression et diminue le retrait; on peut tester des BAP avec deux tiers du gravier 8/15 contre un tiers du gravier 3/8.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AFGC., 2008, Association Française du Génie Civil, les BAP : recommandations provisoires pour l'emploi des bétons autoplaçants, 63 p.
- [2] Amouri C., 2009, Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité), thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 168 p.
- [3] Andriolo F.R., Sgarboza B.C., 1985, Proceeding of the 7 th International Conference of Alkali-Aggregate Reaction (AAR), Grattan Bellow (éditeur), p. 66-70.
- [4] Assié S., 2004, Durabilité des bétons autoplaçants, thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Toulouse, 149 p.
- [5] Badogiannis E., Tsivilis S., Papadakis V.G., Chaniotakis E., 2002, The effects of MK on concrete properties, Proceeding of Dundee Conference, p. 81-89.
- [6] Benkechkeche G., 2007, Etude du comportement différé des bétons autoplaçants (influence des paramètres de composition et de chargement), thèse de magister, Université Mentouri Constantine, 168 p.
- [7] Benkechkeche G., Boukni B., Ferkous S., Houari H., 2008, Pathologie des bétons autoplaçants, Colloque National : Pathologie des Constructions : Du Diagnostic à la Réparation, Université Mentouri Constantine, p. 1-8.
- [8] Bensebti S.E., 2008, Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux, thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 129 p.
- [9] Bethmont S., 2005, Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP), thèse de doctorat, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 159 p.
- [10] Bosc J.L., Kouame K., Pera J., 1993, Improvement of concrete durability in tropical marine environment by adding metakaolin and superplasticizers Proceedings of Sixth International Conference on Durability of Building Materials and Components, Omiya Japan (Nagataki T, Nireki, Tomosawa F, editors), Vol. 1, p. 448-457.
- [11] Boukni B., 2007, Tenue au feu des bétons autoplaçants, mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, 164 p.
- [12] Bready P., Chabannet M., Pera J., 1989, Microstructural and porosity of MK blended cements, Material Research Society Proceeding n° 137, p. 431-436.
- [13] Bresson A., 2006, Influence de la minéralogie sur le comportement des mortiers de ciment au jeune âge, thèse de maîtrise de science, université Laval Québec, 197 p.

- [14] Brooks J.J., Megat Johari M.A., 2001, Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete, *Cement and Concrete Composite (CCC)*, Vol. 23, n° 6, p. 495-502.
- [15] Buathier S., 1998, Modélisation en régime dynamique d'un four tournant, Rapport de DEA Procédé, Systèmes et Matériaux, Université Paul Sabatier de Toulouse, p. 1-11.
- [16] Cabrera J., Rojas M.F., 2000, Mechanism of hydration of metakaolin-lime-water system, *Cement and Concrete Research (CCR)*, Vol. 31, n° 4, p. 177-182.
- [17] Cassagnabere F., 2007, produits préfabriqués en béton file : vers l'amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procédé de production, thèse de doctorat, Université de Toulouse III, 207 p.
- [18] Chelouah N., Mehidi K., Chikh Amer H., Souidi F., 2009, Etude de l'influence de l'ajout d'argile broyée cuite sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité des bétons, Rapport de recherche, J0400620070006, p.1-20.
- [19] Chinje melo U., Billong N., 2004, Activité pouzzolanique des déchets de briques et tuiles cuites, *African Journal of Science and Technology (AJST)*, Science and Engineering Séries, Vol. 5, n° 1, p. 92-100.
- [20] Courard L., Darimont A., Schouterden M., Ferauche F., Willem X., Degeimbre R., 2003, Durability of mortar modified with metakaolin, *Cement and Concrete Research (CCR)*, Vol. 33, n° 9, p. 1473-1479.
- [21] Davies T.W., 1984, Equipment for the study of flash heating of particules suspension, *High Temperature Technology*, Vol. 3, p. 141-147.
- [22] De Larrard F., 2002, Construire en béton l'essentiel sur les matériaux, thèse de doctorat, Presses de l'Ecole National Des Ponts et Chaussées, 199 p.
- [23] De Larrard F., 1999, Structures granulaires et formulation des bétons, ouvrage n° OA 34, Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées, 414 p.
- [24] Fiches techniques, Tome 2, 2006, (Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre), Auteurs : CIM béton, Centre d'Information sur le Ciment et ses Applications, 134 p.
- [25] Gaboriau H., Gallias J.L., Le Berre P., 1996, Utilisation des poudres minérales naturelles ultrafines pour l'amélioration des performances des bétons, Congrès de la Société de l'Industrie Minérale, Montpellier, p. 1-10.
- [26] Ghezal A., 1999, Modélisation Statique du Comportement des BAP et Optimisation, Mémoire de maitrise en génie civil, Université de Sherbrooke, p. 88-889, p. 155-156.



- [27] Gleyze P.J.P. Cyr M. Escadeillas G., 2007, Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes, *Cement and Concrete Composite (CCC)*, Vol. 29, n° 2, p. 80-87.
- [28] Govin A., 2004, Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment, Modification de l'hydratation du ciment par le bois, thèse de doctorat, Ecole National Supérieur des Mines de Saint Etienne, 216 p.
- [29] Guide pratique, Holcim (Belgique), 2007, Auteurs : Materials & Applications Center, Holcim Western Europe, 1ère édition, 91 p.
- [30] Haddad O., Aggoun S., Nachbaur L., Waller V. et Cabrillac R., 2005, Extension de la méthode du mortier de béton équivalent aux bétons autoplaçants, *Annales du bâtiment et travaux publics*, p. 13-17.
- [31] Hadriche M.S., 1998, Modélisation du comportement du béton autoplaçant : effet de composition, thèse de doctorat, Sherbrooke (Québec), Canada, 250 p.
- [32] Hénin J.P., Pinoncely A., 1986, La calcination flash, *Mines et Carrières Technologie* n° 6, p. 249-252.
- [33] Hyvert N., 2009, Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton, thèse de doctorat, Université de Toulouse, 288 p.
- [34] Itim A., Ezziane K., Kadri El.H., 2010, Etude des déformations de retrait d'un mortier contenant différentes additions minérales, *Symposium International sur la Construction en Zone Sismique (SICZS)*, Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), p. 1-11.
- [35] Kerbouche A., 2009, Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers, thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique (Enset) Oran, 110 p.
- [36] Khatib J.M., Sabir S., Wild S., 1996, Some properties of MK paste and mortar, *Concrete for environmental enhancement and Protection*, Ed. Dhir R.K. and Dyer T.D. Spon Press, Londres, p.1-20.
- [37] Khelifa M R., 2009, Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants, thèse de doctorat, 178 p.
- [38] Kostuch J.A., Walters G.V., Jones T.R., 1993, High performance concrete incorporating MK: a review, *Concrete 2000*, University of Dundee, p. 1799-1811.
- [39] Le Ngoc.D., 2007, Amélioration de la régularité du béton en production, thèse de doctorat, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 248 p.

- [40] Li Z., Ding Z., 2003, Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag, *Cement and Concrete Research*, vol. 33, p. 579-584.
- [41] Manai K., 1995, Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants, *Mémoire de maîtrise des sciences appliquées*, Sherbrooke, Canada, 162 p.
- [42] Meziani M., 2009, Effet de la microsilice sur le comportement mécanique, le retrait et la résistance à l'action des sulfates du béton autoplaçant, thèse de magister, Université A/Mira Bejaia, 148 p.
- [43] Moulin E., Blanc P., Sorrentino D., 2001, Influence of key cement chemical parameter on the properties of MK blended cement, *Cement and Concrete Composite (CCC)*, n° 23, p. 463-469.
- [44] Nachbaur L., Kaplan D. and Marchese G., 2003, Extension of Concrete Equivalent Mortar (CEM) method to Self Compacting Concrete, 7th CANMET/ACI, international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete, Berlin, Germany, Supplementary Papers, p. 333-346.
- [45] Okamura H. and Ouchi M., 2003, Self-Compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol, 1, No. 1, p. 5-15.
- [46] Okamura H. and Ozawa K., 1995, Self-Compactable High-Performance Concrete in Japan, (Second CANMET/ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas, ACI), p. 159-2, p. 31-44.
- [47] Pera J., 2001, Metakaolin and calcined clay, *Cement and Concrete Composite (CCC)*, n°23, p.1-10.
- [48] Rojas M.F., Cabrera J., 2001, Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and water-blended cement systems at 20°C, *CCR* (31-4), p. 519-527.
- [49] Roux S., 2008, Evaluation des risques de biodégradation des bétons en contact avec une eau douce naturelle, thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg.
- [50] Sabir B.B., Wild S., Bai J., 2001, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cement and Concrete Composite (CCC)*, Vol. 23, n° 6, p. 441-454.
- [51] Salvador S., 1992, Production de pouzzolanes de synthèse par calcinations flash de sols argileux : Etude des produits et conception d'une installation, thèse de doctorat d'INSA Toulouse, 216 p.
- [52] Schwartzentruber A. et Catherine C., 2000, La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) – Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés, *Matériaux et Structures*, Vol. 33, p. 475-482.

[53] Sedran T., 1999, Rhéologie et Rhéométrie des Bétons, Application aux Bétons Autonivelants, thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 244 p.

[54] Sedran T., De Larrard F., et Angot D., 1994, Prévion de la Compacité des Mélanges Granulaires par le Modèle de Suspension Solide I. Fondements théoriques et étalonnage du modèle, Bull. Liaison Lobo. P et Ch. -194, Réf. 3862.

[55] Sedran T., De Larrard F., et Angot D., 1994, Prévion de la Compacité des Mélanges Granulaires par le Modèle de Suspension Solide II. Validation. Cas des mélanges confinés, Bull. Liaison Lobo. P et Ch. -194, Réf. 3863.

[56] Tafraoui A., 2009, Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie), thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Toulouse, 231 p.

[57] Terence C.H., 2005, Silica fume, User's Manual, Silica Fume Association, Federal Highway Administration, p. 183.

[58] Turcry Ph., 2004, Retrait et fissuration des bétons autoplaçants, influence de la formulation), thèse de doctorat, l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes, 229 p.

[59] Trudel A., 1996, Maniabilité, Uniformité et Comportement Structural du Béton Autonivelant à Haute Performance, Mémoire de Maîtrise des Sciences Appliquées. Spécialité : Génie Civil. Université de Sherbrooke, Canada, 198 p.

[60] Vu D.D., Stroeven P., Bui V.B., 2001, Strength and durability aspects of calcined kaolin blended Portland cement mortar and concrete, Cement and Concrete Composite (CCC), n° 23, p. 471-478.

[61] Wild, Gallius A., Hansen H., Pederson L., and Swabowski J., 1997, Pozzolanic properties of a variety of European clay bricks, Building Research and Information, Vol. 25, n° 3, p. 170-175.

[62] Yammine J., 2007, Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques, thèse de doctorat, l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 262 p.

## REFERENCES NORMATIVES

**ASTM C 618-98** : Norme internationale. Standard specification for Fly Ash and Raw or calcined Natural Pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete.

**NF P 18-201(DTU 21)** : Norme française. Les exigences particulières sur la composition des bétons.

**XP P 18-305** : Normalisation française. Contrôle de conformité et critères de conformité. Spécification des bétons.

**NF P 18-404** : Norme française. Essais d'étude, de convenance et de contrôle. Confection et conservation des éprouvettes.

**NF P18-435** : Norme française. Essai pour béton durci. Masse volumique du béton.

**NF P 18- 440** : Norme française. Essai pour béton durci. Masse volumique.

**NF P 18-443** : Norme française. Essai pour béton frais. Teneur en air – méthode de compressibilité.

**NF P 18-455** : Norme française. Essai pour béton durci. Résistance à la compression des éprouvettes.

**XP P 18- 540** : Normalisation française. Granulats. Définitions, conformité, spécifications.

**XP P18-545** : Norme française. Granulats. Éléments de définition, conformité et codification.

**NF P 18- 553** : Normalisation française. Granulats. Préparation d'un échantillon pour essai.

**NF P 18-554** : Normalisation française. Granulats. Mesures des masses volumiques, de la porosité du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux.

**NF P 18-555** : Normalisation française. Granulats. Mesures des masses volumiques, coefficient d'adsorption et teneur en eau des sables.

**NF P 18-558** : Normalisation française. Granulats. Détermination de la masse volumique absolue des fines.

**NF P 18-560** : Normalisation française. Granulats. Analyse granulométrique par tamisage.

**NF P 18-561** : Normalisation française. Granulats. Mesure du coefficient d'aplatissement.

**NF P 18-573** : Normalisation française. Granulats. Essai Los Angeles.

**NF P 18-591** : Normalisation française. Granulats. Détermination de la propreté superficielle.

**NF P 18-592** : Normalisation française. Granulats. Essai au bleu de méthylène : Méthode à la tâche.

**NF P18-597** : Normalisation française. Granulats. Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10 % de fines.

**NF EN 196-3** : Norme française. Méthodes d'essais des ciments. Détermination du temps de prise et de la stabilité.

**NF EN 933-3** : Norme française. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques

**NF EN 933-8** : Norme française. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats : Évaluation des fines- Equivalent de sable.

**NF EN 933-9** : Norme française. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats : Qualification des fines - Essai au bleu de méthylène.

**NF P 94-050** : Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux (méthode par étuvage).

**NF P 94-057** : Analyse granulométrique des sols (méthode par sédimentation).

**NF P 94-064** : Masse volumique sèche d'un élément de roche.

**NF P 94-068** : Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux

**NF EN 1008** : Norme française. Eau de gâchage pour bétons. Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.

**EN 206-1** : Norme européenne. Béton. Spécification, performances, production et conformité.

**NF EN 12390-3** : Essai pour béton durci (Résistance à la compression des éprouvettes).

**Avec ;**

ASTM : American Society for the Testing of Materials.

DTU : Document Technique Unifié.

NF : Norme Française.

NF P : Norme Française applicable au bâtiment et génie civil.

EN : Norme Européenne définitive.

LCPC : Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées.

65A du CCTG : fascicule N°65A du Cahier des Clauses Techniques Générales.



# Annexe : A

## Ciment Résistant aux Sulfates CPA CEM I - 42.5 NA443

Le ciment résistant aux sulfates est manufacturé en broyant du clinker contenant un taux réduit d'aluminates de calcium avec une proportion plus faible de gypse que celle du ciment portland composé.

### Usages :

Le ciment résistant aux sulfates est généralement utilisé pour les ouvrages en béton exposés à des conditions sévères dues à l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau souterraine tels que :

- Les fondations et les structures dans les milieux agressifs
- Les travaux maritimes
- Les stations de dessalement et d'épuration
- Les travaux hydrauliques
- Les barrages et les digues de soutènement collinaire

### Analyses et propriétés physiques :

#### Analyses chimiques :

Perte au feu %	< 1.50
Résidus insolubles %	< 0.70
Teneur en anhydride sulfurique SO <sub>3</sub> %	1.80 - 2.00
Teneur en magnésie MgO %	1.60 - 1.80
Teneur en chlorures %	0.01 - 0.03

### Composition hypothétique du clinker :

Silicates tricalciques, C <sub>3</sub> S %	55.00 - 59.00
Silicates bicalciques, C <sub>2</sub> S %	17.00 - 21.00
Aluminates tricalciques, C <sub>3</sub> A %	2.80 - 3.20
Aluminoferrites t tricalciques, C <sub>4</sub> AF %	13.00 - 15.00

### Propriétés physiques :

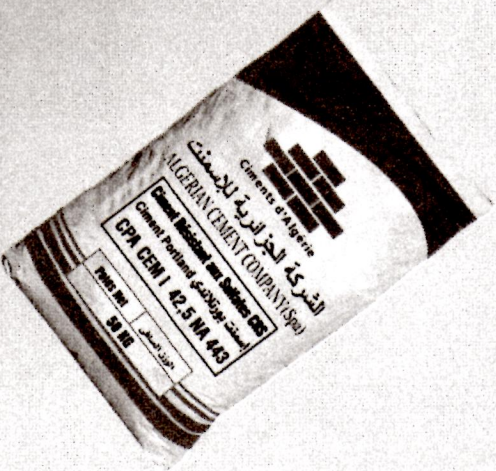
Consistance normale de la pâte de ciment %	25.50 - 26.50
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm <sup>2</sup> /gm)	3000 - 3200
Retrait à 28 jours µm/m	< 1000
Expansion mm	< 5

### Temps de prise à 20° C :

Début de prise (heure : min)	3 : 00
Fin de prise (heure : min)	4 : 20

### Résistance à la compression : EN196 - 1/Mortier

2 jours (bars)	160 - 200
28 jours (bars)	> 425





## MEDAFLOW 30

### Superplastifiant – Haut réducteur d'eau

#### DESCRIPTION

Le MEDAFLOW 30 est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet retardateur.

#### CARACTERISTIQUES

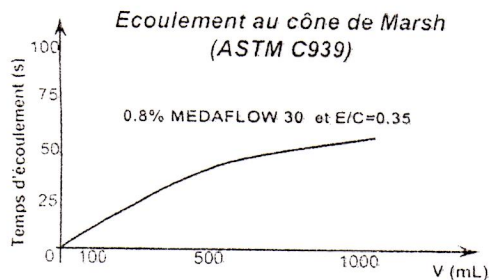
- Forme ..... Liquide
- Couleur ..... Jaunâtre
- pH ..... 6 – 6,5
- Densité .....  $1.07 \pm 0.01$
- Teneur en chlore .....  $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec ..... 30%

#### PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :

Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très faible
- l'amélioration considérable de la fluidité
- une très bonne maniabilité
- un long maintien d'ouvrabilité
- d'éviter la ségrégation
- de faciliter la mise en œuvre du béton



Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

#### DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

#### DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0.5 à 2.0 % du poids de ciment soit 0.5 à 1.850 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

#### MODE D'EMPLOI

Le MEDAFLOW 30 est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.



# Annexe : B

## MEDAFLOW 30

### CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le MEDAFLOW 30 est conditionné en bidons de 10Kg, et en fûts de 210 Kg et 240 Kg.

#### Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ( $5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$ ).

### PRECAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : [www.granitex.dz](http://www.granitex.dz)

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en Avril 2005.

*Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.*



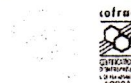
غرانيتكس

Zone industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

[www.granitex.dz](http://www.granitex.dz) - E-mail: [granitex@granitex.dz](mailto:granitex@granitex.dz)





# MEDACOL BSE

## Adjuvant pour bétons et mortiers coulés dans l'eau

### DESCRIPTION

Le **MEDACOL BSE** est un adjuvant en poudre destiné à la confection de bétons et mortiers coulés dans l'eau.

### CARACTERISTIQUES

Le **MEDACOL BSE** est composé essentiellement d'agents colloïdaux et de micro silice ultra fine.

Nature ..... poudre grisâtre  
Densité ..... environ 0,5

### PROPRIETES ET EFFETS

Le **MEDACOL BSE** rend le béton plus plastique voire visqueux, ce qui facilite le bétonnage sous l'eau, sans lessivage ni ségrégation.

Avec l'ajout d'un super plastifiant, le même béton peut être pompé avec un rapport E/C très bas par rapport à un béton témoin pompé dans les mêmes conditions.

### DOMAINES D'APPLICATION

- Travaux en milieux marins
- Caissons immergés
- Alvéoles pour blocs de quais
- Colmatage de cavernes pour digues à talus
- Coulis d'injection
- Bétons de pieux dans terrains absorbants

### MODE D'EMPLOI

Le **MEDACOL BSE** doit être mélangé à sec avec tous les composants du béton (ciment, sable et agrégats) avant introduction de l'eau de gâchage.

Introduire l'eau de gâchage en une seule fois, puis malaxer pendant au moins 2 minutes pour permettre une bonne répartition de tous les constituants du béton.

*Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenue pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.*

La consistance du béton doit être fluide ; les résultats recherchés sont :

- étalement (table DIN) ..... 600 mm
- affaissement au cône d'Abrams ..... 200 mm

Il est nécessaire de procéder à des essais de convenue afin de déterminer la quantité d'eau de gâchage nécessaire.

### CONSOMMATION

A titre indicatif, la consommation du **MEDACOL BSE** sera :

#### 1- Pour béton coulé dans l'eau :

- Eau stable : 0,8% par rapport au poids du ciment
- Eau faiblement agitée : 1,6 % par rapport au poids du ciment
- Eau fortement agitée : 2,4 % par rapport au poids du ciment

#### 2- Pour coulis d'injection

- 0.3 à 2% par rapport au poids de l'eau

Le dosage dépendra de la viscosité recherchée du coulis.

### CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Sacs en papier kraft de 20 kg.

#### Durée de conservation :

06 mois dans son emballage d'origine, à l'abri de l'humidité et de la chaleur.

### PRECAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : [www.granitex.dz](http://www.granitex.dz)



**Granitex**

فرانيتكس

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél: (213) 021 51 66 81 & 82

Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

[www.granitex.dz](http://www.granitex.dz) - E-mail: [granitex@granitex.dz](mailto:granitex@granitex.dz)



## Annexe D

### Masses volumiques humides du BAP (0 % ACB)

Age (jours)	N°	Poids (g)	Volume ( $10^{-6} \times m^3$ )	$\rho_s$ (Kg/ m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (Kg/ m <sup>3</sup> ) Moyenne
1	1	14562	6430.72	2264	2245.30
	2	14438	6430.72	2245	
	3	14324	6430.72	2227	
7	1	14690	6430.72	2284	2265.60
	2	14576	6430.72	2266	
	3	14454	6430.72	2247	
14	1	14694	6430.72	2285	2267.00
	2	14582	6430.72	2267	
	3	14464	6430.72	2249	
21	1	14706	6430.72	2287	2268.60
	2	14592	6430.72	2269	
	3	14472	6430.72	2250	
28	1	14700	6430.72	2285	2268.00
	2	14588	6430.72	2268	
	3	14470	6430.72	2250	
60	1	14736	6430.72	2291	2273.00
	2	14620	6430.72	2273	
	3	14500	6430.72	2255	
90	1	14746	6430.72	2297	2276.00
	2	14632	6430.72	2275	
	3	14510	6430.72	2256	
120	1	14772	6430.72	2297	2278.60
	2	14656	6430.72	2279	
	3	14536	6430.72	2260	
150	1	14776	6430.72	2297	2279.30
	2	14664	6430.72	2280	
	3	14542	6430.72	2261	
180	1	14794	6430.72	2300	2281.67
	2	14678	6430.72	2282	
	3	14556	6430.72	2263	

## Annexe D

### Masses volumiques humides du BAP (5 % ACB)

Age (jours)	N°	Poids (g)	Volume ( $10^{-6} \times m^3$ )	$\rho_s$ (Kg/ m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (Kg/ m <sup>3</sup> ) Moyenne
1	1	14570	6430.72	2265	2257.00
	2	14554	6430.72	2263	
	3	14428	6430.72	2243	
7	1	14690	6430.72	2284	2276.30
	2	14678	6430.72	2282	
	3	14556	6430.72	2263	
14	1	14708	6430.72	2287	2279.30
	2	14696	6430.72	2285	
	3	14572	6430.72	2266	
21	1	14716	6430.72	2288	2280.30
	2	14702	6430.72	2286	
	3	14584	6430.72	2267	
28	1	14730	6430.72	2290	2282.30
	2	14716	6430.72	2288	
	3	14596	6430.72	2269	
60	1	14746	6430.72	2293	2285.00
	2	14730	6430.72	2290	
	3	14612	6430.72	2272	
90	1	14764	6430.72	2296	2287.60
	2	14746	6430.72	2293	
	3	14626	6430.72	2274	
120	1	14794	6430.72	2300	2292.00
	2	14774	6430.72	2297	
	3	14658	6430.72	2279	
150	1	14794	6430.72	2300	2292.30
	2	14778	6430.72	2298	
	3	14658	6430.72	2279	
180	1	14800	6430.72	2301	2293.33
	2	14784	6430.72	2299	
	3	14664	6430.72	2280	

## Annexe D

### Masses volumiques humides du BAP (10 % ACB)

Age (jours)	N°	Poids (g)	Volume ( $10^{-6} \times m^3$ )	$\rho_s$ (Kg/ m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (Kg/ m <sup>3</sup> ) Moyenne
1	1	14408	6430.72	2240	2249.00
	2	14446	6430.72	2246	
	3	14550	6430.72	2262	
7	1	14544	6430.72	2261	2700.00
	2	14582	6430.72	2267	
	3	14676	6430.72	2282	
14	1	14560	6430.72	2264	2272.00
	2	14600	6430.72	2270	
	3	14692	6430.72	2284	
21	1	14560	6430.72	2264	2273.00
	2	14600	6430.72	2270	
	3	14694	6430.72	2285	
28	1	14568	6430.72	2265	2274.00
	2	14608	6430.72	2271	
	3	14702	6430.72	2286	
60	1	14582	6430.72	2267	2276.00
	2	14620	6430.72	2273	
	3	14714	6430.72	2288	
90	1	14590	6430.72	2268	2278.00
	2	14636	6430.72	2276	
	3	14728	6430.72	2290	
120	1	14618	6430.72	2273	2281.60
	2	14660	6430.72	2279	
	3	14750	6430.72	2293	
150	1	14628	6430.72	2274	2283.00
	2	14762	6430.72	2295	
	3	14668	6430.72	2280	
180	1	14632	6430.72	2275	2283.66
	2	14670	6430.72	2281	
	3	14760	6430.72	2295	

## Annexe D

### Masses volumiques humides du BAP (15 % ACB)

Age (jours)	N°	Poids (g)	Volume ( $10^{-6} \times m^3$ )	$\rho_s$ (Kg/ m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (Kg/ m <sup>3</sup> ) Moyenne
1	1	14742	6430.72	2292	2263.30
	2	14290	6430.72	2222	
	3	14638	6430.72	2276	
7	1	14858	6430.72	2310	2282.30
	2	14416	6430.72	2242	
	3	14758	6430.72	2295	
14	1	14868	6430.72	2312	2283.70
	2	14428	6430.72	2243	
	3	14766	6430.72	2296	
21	1	14884	6430.72	2314	2286.00
	2	14446	6430.72	2246	
	3	14782	6430.72	2298	
28	1	14886	6430.72	2315	2287.00
	2	14450	6430.72	2247	
	3	14786	6430.72	2299	
60	1	14904	6430.72	2317	2289.00
	2	14462	6430.72	2248	
	3	14804	6430.72	2302	
90	1	14922	6430.72	2320	2292.00
	2	14476	6430.72	2251	
	3	14822	6430.72	2305	
120	1	14938	6430.72	2323	2295.00
	2	14500	6430.72	2255	
	3	14836	6430.72	2307	
150	1	14944	6430.72	2324	2295.70
	2	14506	6430.72	2256	
	3	14840	6430.72	2307	
180	1	14950	6430.72	2325	2297.33
	2	14516	6430.72	2257	
	3	14848	6430.72	2310	

## Annexe D

### Masses volumiques humides du BAP (20 % ACB)

Age (jours)	N°	Poids (g)	Volume ( $10^{-6} \times m^3$ )	$\rho_s$ (Kg/ m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (Kg/ m <sup>3</sup> ) Moyenne
1	1	14670	6430.72	2281	2272.70
	2	14608	6430.72	2271	
	3	14576	6430.72	2266	
7	1	14786	6430.72	2299	2291.30
	2	14728	6430.72	2290	
	3	14694	6430.72	2285	
14	1	14788	6430.72	2299	2291.30
	2	14728	6430.72	2290	
	3	14696	6430.72	2285	
21	1	14804	6430.72	2302	2294.00
	2	14744	6430.72	2293	
	3	14710	6430.72	2287	
28	1	14804	6430.72	2302	2294.30
	2	14746	6430.72	2293	
	3	14716	6430.72	2288	
60	1	14828	6430.72	2306	2298.30
	2	14770	6430.72	2297	
	3	14738	6430.72	2292	
90	1	14846	6430.72	2308	2300.30
	2	14788	6430.72	2299	
	3	14754	6430.72	2294	
120	1	14860	6430.72	2310	2303.00
	2	14802	6430.72	2302	
	3	14772	6430.72	2297	
150	1	14866	6430.72	2311	2303.30
	2	14806	6430.72	2302	
	3	14774	6430.72	2297	
180	1	14878	6430.72	2313	2305.33
	2	14818	6430.72	2304	
	3	14784	6430.72	2299	

## Annexe E

### Résistance à la compression des BAP

BAP	Age (jours)			
	7	28	90	180
BAP (0)	31.05	38.32	47.27	48.12
	31.85	39.31	45.77	49.00
	27.87	37.07	44.28	47.24
<b>Résistance moyenne (MPa)</b>	<b>30.25</b>	<b>38.23</b>	<b>45.77</b>	<b>48.12</b>
BAP (5)	19.60	30.05	42.79	46.04
	18.91	30.55	43.78	47.14
	21.59	32.94	44.78	45.06
<b>Résistance moyenne (MPa)</b>	<b>20.03</b>	<b>31.18</b>	<b>43.78</b>	<b>46.08</b>
BAP (10)	23.38	28.76	48.27	47.05
	23.88	30.65	41.80	45.50
	23.38	32.54	41.80	48.00
<b>Résistance moyenne (MPa)</b>	<b>23.55</b>	<b>30.65</b>	<b>43.96</b>	<b>46.85</b>
BAP (15)	23.38	29.16	37.32	44.78
	21.39	30.15	41.30	41.30
	20.40	31.15	37.32	40.80
<b>Résistance moyenne (MPa)</b>	<b>21.72</b>	<b>30.15</b>	<b>38.65</b>	<b>42.29</b>
BAP (20)	18.41	28.06	35.63	39.31
	19.40	27.67	37.02	40.80
	19.10	30.95	36.82	39.81
<b>Résistance moyenne (MPa)</b>	<b>18.97</b>	<b>28.89</b>	<b>36.49</b>	<b>39.97</b>

## Annexe F

### Retrait de dessiccation du BAP (0 % ACB)

N°	Poids (gr)	Age (jours)	L (mm)	l (mm)	dl (mm)	$\varepsilon(t) = \frac{dl}{L}$ (mm/m)	$\varepsilon(t)$ Moyen (mm/m)
1	11395	1	500	461	39	0.078	0.065
2	11760	1	500	468	32	0.064	
3	11578	1	500	474	26	0.052	
1	11325	7	500	457	43	0.086	0.073
2	11715	7	500	463	37	0.074	
3	11520	7	500	470.5	29.5	0.059	
1	11315	14	500	457	43	0.086	0.074
2	11705	14	500	463	37	0.074	
3	11510	14	500	469	31	0.062	
1	11310	21	500	456	44	0.088	0.079
2	11700	21	500	460	40	0.080	
3	11505	21	500	465	35	0.070	
1	11310	28	500	451	49	0.098	0.086
2	11695	28	500	457	34	0.086	
3	11503	28	500	463	37	0.074	
1	11305	60	500	447	53	0.106	0.093
2	11685	60	500	453	47	0.094	
3	11495	60	500	460	40	0.080	
1	11300	90	500	446	54	0.108	0.096
2	11680	90	500	452	48	0.096	
3	11490	90	500	458	42	0.084	
1	11285	120	500	439	61	0.122	0.107
2	11680	120	500	447	53	0.106	
3	11483	120	500	453.5	46.5	0.093	
1	11250	150	500	435	65	0.130	0.117
2	11630	150	500	442	58	0.116	
3	11440	150	500	447.5	52.5	0.105	
1	11220	180	500	426	74	0.148	0.134
2	11610	180	500	433	67	0.134	
3	11415	180	500	440	60	0.120	
1	11175	210	500	427	73	0.146	0.133
2	11560	210	500	433	67	0.134	
3	11368	210	500	440.5	59.5	0.119	
1	11200	240	500	425	75	0.150	0.134
2	11590	240	500	433	67	0.134	
3	11320	240	500	441	59	0.118	
1	11115	270	500	426	76	0.152	0.134
2	11510	270	500	433	67	0.134	
3	11320	270	500	442	58	0.116	



## Annexe F

### Retrait de dessiccation du BAP (5 % ACB)

N°	Poids (gr)	Age (jours)	L (mm)	l (mm)	dl (mm)	$\varepsilon(t) = \frac{dl}{L}$ (mm/m)	$\varepsilon(t)$ Moyen (mm/m)
1	11630	1	500	431	69	0.138	0.109
2	11602	1	500	445	55	0.110	
3	11618	1	500	460	40	0.080	
1	11575	7	500	429	71	0.142	0.113
2	11545	7	500	472	28	0.056	
3	11555	7	500	443	57	0.114	
1	11590	14	500	435	65	0.130	0.101
2	11550	14	500	449	51	0.102	
3	11570	14	500	464	36	0.072	
1	11585	21	500	438	62	0.124	0.091
2	11545	21	500	454	46	0.092	
3	11565	21	500	471	29	0.058	
1	11580	28	500	434	66	0.132	0.106
2	11540	28	500	447	53	0.106	
3	11560	28	500	460	40	0.080	
1	11575	60	500	429	71	0.142	0.116
2	11535	60	500	442	58	0.116	
3	11550	60	500	455	45	0.090	
1	11565	90	500	425	75	0.150	0.133
2	11530	90	500	433	67	0.134	
3	11545	90	500	442	58	0.116	
1	11555	120	500	424	76	0.152	0.125
2	11520	120	500	437	63	0.126	
3	11535	120	500	451	49	0.098	
1	11545	150	500	404	96	0.192	0.165
2	11515	150	500	417	83	0.166	
3	11530	150	500	431	69	0.138	
1	11500	180	500	414	86	0.172	0.147
2	11470	180	500	426	74	0.148	
3	11490	180	500	439	61	0.122	
1	11455	210	500	407	93	0.186	0.173
2	11420	210	500	413	87	0.174	
3	11435	210	500	420	80	0.160	
1	11480	240	500	406	94	0.188	0.162
2	11450	240	500	419	81	0.162	
3	11460	240	500	432	68	0.136	
1	11405	270	500	405	95	0.192	0.164
2	11370	270	500	418	82	0.164	
3	11385	270	500	432	68	0.136	

## Annexe F

### Retrait de dessiccation du BAP (10 % ACB)

N°	Poids (gr)	Age (jours)	L (mm)	l (mm)	dl (mm)	$\varepsilon(t) = \frac{dl}{L}$ (mm/m)	$\varepsilon(t)$ Moyen (mm/m)
1	11300	1	500	431	69	0.138	0.114
2	11150	1	500	443	57	0.114	
3	11225	1	500	454.5	45.5	0.091	
1	11255	7	500	430	70	0.140	0.116
2	11100	7	500	442	58	0.116	
3	11178	7	500	454	46	0.092	
1	11245	14	500	436	64	0.128	0.103
2	11095	14	500	448	52	0.104	
3	11170	14	500	460.5	39.5	0.079	
1	11200	21	500	433	67	0.134	0.110
2	11040	21	500	445	55	0.110	
3	11120	21	500	456.5	43.5	0.087	
1	11235	28	500	430	70	0.140	0.116
2	11080	28	500	442	58	0.116	
3	11158	28	500	454	46	0.092	
1	11230	60	500	427	73	0.146	0.123
2	11070	60	500	438	62	0.124	
3	11150	60	500	450.5	49.5	0.099	
1	11215	90	500	430	70	0.140	0.118
2	11065	90	500	441	59	0.118	
3	11140	90	500	452	48	0.096	
1	11210	120	500	422	78	0.156	0.131
2	11055	120	500	434	66	0.132	
3	11133	120	500	446.5	53.5	0.107	
1	11200	150	500	426	74	0.148	0.131
2	11040	150	500	434	66	0.132	
3	11120	150	500	442.5	57.5	0.115	
1	11165	180	500	406	94	0.188	0.164
2	11000	180	500	418	82	0.164	
3	11083	180	500	429.5	70.5	0.141	
1	11100	210	500	396	104	0.208	0.179
2	10935	210	500	410	90	0.180	
3	11018	210	500	424.5	75.5	0.151	
1	11080	240	500	400	100	0.200	0.153
2	10910	240	500	423	77	0.154	
3	11005	240	500	447	53	0.106	
1	11060	270	500	400	100	0.200	0.152
2	10900	270	500	424	76	0.152	
3	11000	270	500	448	52	0.104	

## Annexe F

### Retrait de dessiccation du BAP (15 % ACB)

N°	Poids (gr)	Age (jours)	L (mm)	l (mm)	dl (mm)	$\varepsilon(t) = \frac{dl}{L}$ (mm/m)	$\varepsilon(t)$ Moyen (mm/m)
1	11335	1	500	431	69	0.138	0.108
2	11295	1	500	446	54	0.108	
3	11265	1	500	461	39	0.078	
1	11290	7	500	439	61	0.122	0.089
2	11245	7	500	455	45	0.090	
3	11210	7	500	472	28	0.056	
1	11280	14	500	437	63	0.126	0.096
2	11230	14	500	452	48	0.096	
3	11200	14	500	467	33	0.066	
1	11270	21	500	433	67	0.134	0.101
2	11220	21	500	449	51	0.102	
3	11190	21	500	466	34	0.068	
1	11265	28	500	432	68	0.136	0.112
2	11220	28	500	444	56	0.112	
3	11185	28	500	456	44	0.088	
1	11245	60	500	425	75	0.150	0.121
2	11210	60	500	439	61	0.122	
3	11175	60	500	454	46	0.092	
1	11240	90	500	425	75	0.150	0.124
2	11200	90	500	437	63	0.126	
3	11165	90	500	452	48	0.096	
1	11225	120	500	421	79	0.158	0.130
2	11190	120	500	435	65	0.130	
3	11160	120	500	449	51	0.102	
1	11095	150	500	415	85	0.170	0.137
2	11150	150	500	431	69	0.138	
3	11030	150	500	448	52	0.104	
1	11055	180	500	405	95	0.190	0.157
2	11100	180	500	421	79	0.158	
3	11020	180	500	438	62	0.124	
1	11085	210	500	405	95	0.190	0.157
2	11045	210	500	421	79	0.158	
3	11015	210	500	438	62	0.124	
1	11015	240	500	404	96	0.192	0.160
2	11070	240	500	419	81	0.162	
3	11035	240	500	434	66	0.132	
1	11005	270	500	402	98	0.196	0.166
2	11020	270	500	416	84	0.168	
3	10995	270	500	432	68	0.136	

## Annexe F

### Retrait de dessiccation du BAP (20 % ACB)

N°	Poids (gr)	Age (jours)	L (mm)	l (mm)	dl (mm)	$\varepsilon (t) = \frac{dl}{L}$ (mm/m)	$\varepsilon (t)$ Moyen (mm/m)
1	11195	1	500	433	67	0.134	0.108
2	11315	1	500	446	54	0.108	
3	11255	1	500	459	41	0.082	
1	11155	7	500	442	58	0.116	0.090
2	11295	7	500	455	45	0.090	
3	11225	7	500	467.5	32.5	0.065	
1	11155	14	500	434	66	0.132	0.102
2	11295	14	500	449	51	0.102	
3	11225	14	500	463.5	36.5	0.073	
1	11140	21	500	427	73	0.146	0.114
2	11275	21	500	443	57	0.114	
3	11208	21	500	458.5	41.5	0.083	
1	11130	28	500	416	84	0.168	0.136
2	11270	28	500	432	68	0.136	
3	11200	28	500	448	52	0.104	
1	11110	60	500	418	82	0.164	0.132
2	11245	60	500	434	66	0.132	
3	11178	60	500	450	50	0.100	
1	11105	90	500	420	80	0.160	0.144
2	11240	90	500	428	72	0.144	
3	11173	90	500	451.5	48.5	0.097	
1	11095	120	500	413	87	0.174	0.142
2	11230	120	500	429	71	0.142	
3	11163	120	500	444.5	55.5	0.111	
1	11065	150	500	404	96	0.192	0.160
2	11205	150	500	420	80	0.160	
3	11135	150	500	435.5	64.5	0.129	
1	11010	180	500	394	106	0.212	0.147
2	11150	180	500	426	74	0.148	
3	11080	180	500	489	11	0.022	
1	10925	210	500	393	107	0.214	0.182
2	11070	210	500	409	91	0.182	
3	11998	210	500	425	75	0.150	
1	10900	240	500	390	110	0.220	0.160
2	11050	240	500	420	80	0.160	
3	11140	240	500	450	50	0.100	
1	10870	270	500	379	121	0.242	0.178
2	11020	270	500	411	89	0.178	
3	11115	270	500	443	57	0.114	

M<sup>elle</sup> BEZZI Tiziri.

Résumés du mémoire de Magister en Génie Civil, option : Matériaux et Structures.

L'intitulé : Etude et caractérisation d'un béton autoplaçant fait à base d'un ciment avec ajout d'argile cuite et broyée.

#### RÉSUMÉ

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration. Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'autoplaçants que si le matériau final présente des propriétés homogènes, que se soit à l'état frais ou à l'état durci.

Pour réduire l'impact sur l'environnement, nous avons opté pour une formulation de BAP exploitant une argile locale ainsi que des fillers calcaire. L'argile, après broyage et cuisson (ACB) a été utilisées comme substitutif d'une partie du ciment à divers taux d'ajout.

Après l'expérimentation, nous avons constaté que le taux de substitution à retenir est 10 % d'ACB car il a un effet positif sur la résistance à la compression et le retrait du BAP.

MOTS-CLÉS : Béton autoplaçant (BAP), argile cuite broyée (ACB), résistance à la compression, retrait, environnement.

#### ABSTRACT

Self compacting concretes (SCC) are special concretes, which are very fluid and they took place without vibration. We call self compacting concretes the concrete which present homogenate properties (at fresh and at hard form).

In order to reduce environmental impact, we have used a local clay and limestone in the formulation of self compacting concrete. The clay, after was cracking and was baking, we have (calcined clay) and we have utilized it as a substitute of part of cement at different percentages.

After experimentation, we have contested that the percentage of substitute to keep is 10 % of (calcined clay) because it has a positive effect to compressive strength and shrinkage for SCC.

KEYWORDS: Self compacting concrete (SCC), calcined clay, compressive strength, shrinkage, environment.

#### ملخص

الخرسانة الذاتية القولية هي خرسانة قادرة على السيولة و تعمير كل أجزاء و أنحاء القالب الذي توضع فيه مهما يكن شكل أو تسليح هذا القالب. يكون هذا التعمير تحت تأثير الوزن الذاتي فحسب, بمعنى آخر, لا يحتاج هذا النوع من الخرسانة لأي نوع من أنواع عمليات الرص. من اجل تقليص الأثر السلبي علي البيئة, قمنا بتصميم الخرسانة الذاتية القولية علي أساس مواد محلية كالطين المحروق و الكلس. بعد سحق الطين و حرقه, نقوم باستبدال كمية من الاسمنت بنسب مئوية مختلفة من الطين المحروق. النتائج التجريبية أثبتت أن نسبة 10 % من الكمية المستبدلة بالطين المحروق لها اثر ايجابي علي المقاومة الميكانيكية و التقلص للخرسانة الذاتية القولية.

الكلمات المفتاحية : الخرسانة الذاتية القولية, الطين المطبوخ, المقاومة الميكانيكية, التقلص, البيئة.