

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



MEMOIRE DE MAGISTER

SPECIALITE: GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX ET DURABILITE DES CONSTRUCTIONS

THEME

Comportement vis-à-vis des attaques sulfatiques et
de la carbonatation d'un béton autoplaçant à base de
sédiment de dragage

Présenté Par

BELGUESMIA KHALIL

Soutenu le 19/01/2012 devant la commission d'examen:

Président:

- Dr BENDANI.K

Examineurs:

- Dr MEBROUKI.AEK

- Dr BOUHAMOU.N

Encadreur :

- Pr BELAS BELARIBI.N

Année universitaire 2010-2011

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le BON DIEU ALLAH de m'avoir donné du courage et la patience pour réaliser ce modeste travail.

J'adresse aussi mes vifs remerciements :

A mon encadreur Mme BELAS BELARIBI Nadia pour son aide et sa disponibilité.

Aux membres du jury :

Mr BENDANI Karim d'avoir présidé ma soutenance.

Mr MEBROUKI Abdelkader et Mr BOUHAMOU Nasreddine d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Mes remerciements vont également à tous les professeurs du département de génie civil tout aux longs de mon cursus et aux ingénieurs et techniciens des cimenteries Zahana et Lafarge ainsi au technicien du laboratoire de matériaux et géotechnique de l'IGCMO Oran, de la carrière TRACE, à ceux de la société GRANITEX, et à Khalifa Belkacem.

Ainsi qu'à toutes personnes ayant de près ou de loin contribuées à l'élaboration de ce présent mémoire.

Merci

Dédicace

Je voudrais dédier ce modeste travail à :
Mes chers parents pour lesquels les mots ne suffiront pas pour témoigner toute ma gratitude pour leur entière disponibilité, leur assistance et leur dévouement tout au long de mon cursus et la réalisation de ce travail. « Que Dieu me les gardes »

Mes chers frères et sœurs : Mohamed, Oualid, Sabiha et Ikram.

Mes chers amis (es) spécialement Seddik, Salim, Omar, Hamid, Djalel, Hocine, Mounir ; Batoul, Souad, Zahira et Kamelia.

Tous les étudiants de la faculté des sciences et technologie de l'université de Mostaganem.

Et à mes camarades de PG : Fouzia 1 & 2, Zoulikha, Nesrine et Benaïssa.

BELGUESMIA KHALIL

ملخص

نظرا للخصائص التي تتعلق بالخرسانة الذاتية الوضع (BAP)، وخاصة فيما يتعلق بحجم العجينة الكبير، ووجود الإضافات المعدنية بكميات معتبرة، وسلوكها قبل وبعد التصلب بالإضافة إلى ديمومتها و اللذان جدد متأثرين بهذين العاملين.

يمكن استخدام رواسب ذات خصائص بوزولانية كإضافات أو إستبدالات جزئية للإسمنت و تقييمها لتطوير تكنولوجيا الخرسانة.

هذه الدراسة تهدف إلى المساهمة في تعزيز إعادة استخدام الطين المكلس لسد الشرفة (الجزائر) كبديل معدني للإسمنت CPA42.5 لأجل تكوين خرسانة ذاتية الوضع. وهذا ينطوي على المقارنة بين الطين و البوزولان بني صاف في التأثير على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية و ديمومة هذا النوع من الخرسانة على المدى القصير (28 يوما) والمتوسط (90 يوما).

قمنا بدراسة خرسانتين ذاتيتي الوضع تنتميان إلى نفس درجة المقاومة، الأولى تحتوي على البوزولان الطبيعية لبني صاف (BAP-PZ) و تحتوي الثانية على الطينة المكلسة لسد الشرفة (BAP-V).

الحصول على (BAP - V) لا يعني تحقيق فائدة اقتصادية فحسب، وإنما الحصول على خرسانة ذات خصائص مشابهة لخرسانة البوزولان (BAP - PZ). مع تفوق طفيف في المقاومة لصالح BAP - V في المدى القصير. أما نتائج الاختبار لهجوم كبريتات Na_2SO_4 و $MgSO_4$ وغاز CO_2 ، تبين أن تأثيرات الطين المكلس أفضل من البوزولان على الخواص الفيزيائية والميكانيكية و ديمومة الخرسانات التي تحتويها.

الكلمات الرئيسية : سد الشرفة - الطمي -- البوزولان -- خرسانة مصدرها الطين -- خرسانة مصدرها البوزولان --مقاومة ميكانيكية -- ديمومة.

Résumé

En raison des spécificités relatives à la formulation des bétons autoplaçants (BAP) et en particulier ce qui concerne leur volume élevé en pâte et la présence d'ajouts et substituts minéraux en grande quantité, leur comportement à l'état frais et à l'état durci ainsi que leur durabilité sont fortement influencés par ces deux paramètres.

Les sédiments traités ayant des propriétés pouzzolaniques peuvent être utilisés en tant qu'ajouts ou substituts au ciment ce qui fait de la technologie des bétons une voie privilégiée de leur valorisation.

Cette étude vise à apporter une contribution à la valorisation de la vase traitée du barrage de Chorfa II, (Algérie) en tant que substitut minéral au ciment CPA CEMI 42.5 dans la composition d'un béton autoplaçant performant et économique. Il s'agit de comparer l'influence de cette vase calcinée à la pouzzolane naturelle de Béni-Saf sur les caractéristiques physico-mécaniques et sur la durabilité de ce type de bétons à court terme (28 jours) et à moyen terme (90 jours).

Deux formulations ont été étudiées, elles couvrent une seule classe de résistances et deux types de bétons autoplaçants : un BAP à base de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (BAP-PZ) et un BAP à base de la vase calcinée du barrage Chorfa II (BAP-V).

Les BAP contenant de la vase calcinée (BAP-V) représentent non seulement un intérêt économique, mais aussi des performances très comparables à celles obtenues sur des BAP à base de pouzzolane naturelle (BAP-PZ).

Les résultats de la résistance à la compression obtenus sont très proches avec une légère supériorité pour le BAP-V à court terme.

Les résultats des essais des attaques sulfatiques Na_2SO_4 et MgSO_4 et de l'essai de carbonatation accélérée, montrent que la vase calcinée a une influence sensiblement meilleure que celle de la pouzzolane sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité de ces bétons.

Mots clés : Barrage de Chorfa –Vase – pouzzolane – BAP à base de vase – BAP à base de pouzzolane – Résistances mécaniques –Durabilité.

Abstract

Because of the specificities of self-compacting concrete (SCC), especially regarding their high volume paste content and the presence of large amounts of mineral admixtures and substitutes, the behaviour in fresh and hardened state and the durability of these concretes are strongly influenced by these two parameters.

Sediments treated with pozzolanic properties can be used as additions or substitutes to the cement, this possibility makes of concrete technology a privileged way of enhancement.

This study aims to contribute to the enhancement of the treated mud of Chorfa II dam (Algeria) as a mineral substitute for CPA CEMI 42.5 cement in the composition of an economic and preferment self-compacting concrete. the aim is to compare the influence of this calcined mud to the natural pozzolan of Beni Saf (Algeria) on the physical, mechanical behaviour and durability of these concretes in the short-term (28 days) and medium-term (90 days).

Two formulations were studied, thus covering one strength classes, as well as two types of concrete: SCC with natural pozzolan (SCC-PZ), and SCC with calcined mud (SCC-V).

The SCC containing calcined mud represents not only an economic SCC but also performances quite comparables to those obtained on SCC containing natural pozzolan.

The results obtained of the compressive strength are very close with a slight superiority for the BAP-V in the short term.

The results of the different following tests: carbonation and sulphates attacks (Na_2SO_4 and MgSO_4) show that the calcined mud has an influence roughly better than the natural pozzolan on the physico-mechanical behaviour and durability of the SCC.

Key words: Dam of Chorfa – mud – pouzzolan – SCC containing mud - SCC containing pouzzolan – mechanical strength –Durability.

Sommaire

<u>Sommaire</u>	
<u>Listes des figures</u>	
<u>Liste des tableaux</u>	
<u>Résumé</u>	
<u>Abstract</u>	
<u>Introduction générale</u>	

Partie I : Etude bibliographique

CHAPITRE I : Généralités sur les bétons autopla- çants_Toc306100127

I.1 INTRODUCTION.....	1
I.2 CARACTÉRISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS	2
I.2.1 Essai d'étalement (Slump flow).....	3
I.2.2 Essai J-Ring (Essai des anneaux japonais).....	3
I.2.3 Essai de la boîte en L	4
I.2.4 Essai de stabilité au tamis	5
I.2.5 Essai V funnel.....	7
I.2.6 Autres essais de ségrégation.....	8
I.2.7 Essai de ressuage	9
I.3. MÉTHODES DE FORMULATION DES BAP	10
I.3.1 Méthode basée sur l'optimisation du mortier	13
I.3.2 Méthode basée sur l'optimisation de la quantité de pate.....	15
I.3.3 Méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire	15
I.3.4. Méthode de formulation Chinoise.....	16
I.4. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU BÉTON DURCI.....	17
I.4.1. Résistance mécanique	18
I.4.2 Module d'élasticité (en compression) :.....	19
I.4.3 Retrait (état frais, état durci).....	21
I.5. MISE EN OEUVRE DES BAP	26
I.6. CONCLUSION	26

CHAPITRE II: Durabilité des BAP

II.1. INTRODUCTION	27
II.2. LES ATTAQUES CHIMIQUES DES BÉTONS	29
II.2.1. Attaque par les sulfates	29
II.2.1.a. Sources des sulfates	29
II.2.1.b Mécanisme de l'attaque par les sulfates	30
II.2.2. Carbonatation	35
II.2.3. Autres phénomènes affectant la durabilité	39
II.3. CONCLUSION	41

CHAPITRE III : La valorisation dans les BAP

<u>III.1. INTRODUCTION</u>	42
<u>III.2. LES ADDITIONS MINÉRALES DANS LES BAP</u>	42
<u>III.3. LES POUZZOLANES</u>	46
<u>III.3.1 Caractéristiques des pouzzolanes</u>	47
<u>III.3.2. L'activité pouzzolanique</u>	48
<u>III.3.3. Les produits d'hydratation du Clinker</u>	49
<u>III.3.4. Les produits de la réaction pouzzolanique</u>	50
<u>III.4. LA POUZZOLANE NATURELLE DE BENI-SAF</u>	50
<u>III.4.1. Etudes relatives à la Pouzzolane Naturelle de Beni-saf</u>	51
<u>III.5. LES SÉDIMENTS DE DRAGAGE</u>	52
<u>III.5.1. Définition et origine</u>	52
<u>III.5.2. Constitution des sédiments</u>	52
<u>III.5.3. Granulométrie des sédiments</u>	54
<u>III.5.4. Le dragage des sédiments</u>	56
<u>III.5.5. La valorisation des sédiments de dragage</u>	57
<u>III.6. PRÉSENTATION DU BARRAGE CHORFA</u>	59
<u>III.7. CONCLUSION</u>	61
<u>PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE</u>	62

Partie II : Matériaux et méthodes expérimentales

CHAPITRE I : Matériaux utilisés

<u>INTRODUCTION</u>	65
I.1 LE CIMENT	66
I.2. LES LIANTS POZZOLANIQUE	68
I.2.1. les Substituts au Ciment	69
I.2.2 La pouzzolane naturelle de Béni-saf	69
I.2.3 La Vase Calcinée du barrage Chorfa II	70
I.2.3. Caractéristiques physiques des substituts	72
I.3. LES ADJUVENTS	76
I.4. LES GRANULATS	77
<u>I.5. CONCLUSION</u>	79

CHAPITRE II : Méthodes expérimentales

II.1. ÉLABORATION DES BAP	81
II.1.1. Confection des éprouvettes	83
II.2. CARACTÉRISATION GÉNÉRALE DES BÉTONS	85
II.2.1. Etat frais	85
II.2.2. Etat durci	87
II.2.3 Essais de durabilité	89
II.3. CONCLUSION	94

Partie III : Résultats et analyses

CHAPITRE I : Etat frais

I.1. INTRODUCTION	95
I.2. CARACTÉRISTIQUE A L'ETAT FRAIS	95
a) L'étalement au cône	95
b) La ségrégation dynamique	96
c) La ségrégation statique	97
d) La ségrégation due au phénomène de blocage	97
I.3. CONCLUSION	98

CHAPITRE II : Etat durci

II.1. INTRODUCTION	99
II.2. CONTRÔLE DE SÉGRÉGATION	99
II.3. RÉSISTANCES MÉCANIQUES.....	100
II.4. CONCLUSION	101

CHAPITRE III : Durabilité

III.1. INTRODUCTION	102
III.2. LES ATTAQUES SULFATIQUES EXTERNES	102
III.2.1 Milieu témoin (l'eau douce).....	103
III.2.1.a Variation de la masse dans la solution témoin	103
III.2.1.b. Les déformations longitudinales dans la solution témoin	104
III.2.2. Milieux sulfatiques (Na₂SO₄, MgSO₄).....	105
III.2.2.a Interactions chimiques.....	105
III.2.2.b Variation de la masse dans les solutions sulfatiques	106
III.2.2.c Comparaison des gains de masse entre milieu témoin et milieux sulfatiques ..	107
III.2.2.d Les déformations longitudinales dans les solutions sulfaciques	108
III.2.2.e Comparaison des déformations entre milieu témoin et milieux sulfatiques.....	109
III.2.2.f Evaluation de la résistance à la compression	111
III.2.2.g L'examen visuel.....	113
III.3 CARBONATATION ACCÉLERÉE.....	114
III.4. CONCLUSION	116
<u>CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES</u>	
<u>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	

Listes des figures

Figures de la Partie I

Figure I.1: Essai d'étalement au cône (slump flow)	3
Figure I-2 : J-Ring (Anneau Japonais)	4
Figure I.3: Essai de la boîte en L	4
Figure I.4: l'essai de stabilité au tamis [4]	6
Figure I.5: L'essai V-funnel [9]	7
Figure I-6 : Essai du tube en U	8
Figure I-7 : Essai du caisson	8
Figure I-8 : Essai de la passoire.....	8
Figure I.9: Action des superplastifiants.....	11
Figure I.10: Influence de la quantité de superplastifiant sur	12
Figure I.11 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant [32].....	18
Figure I.12 : Résistance mécanique d'un béton vibré et	18
Figure I.13 : Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [27].....	19
Figure I.14 : Ecart relatif du module des BAP ($g = 62\%$, $E_g = 75$ GPa) par rapport aux prévisions du BAEL [28].....	20
Figure I.15 : Retrait plastique de BAP et béton vibré de structure ($T = 20^\circ\text{C}$, 50% HR) [39]	21
Figure I.17 : Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés dérivés [40].	21
Figure I.17 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP [41]	22
Figure I.18 : Retraits endogènes et de dessiccation (à 180 jours) de divers bétons vibrés.....	23
Figure I.19 : Comparaison des retraits de dessiccation	23
Figure I.20 : Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant.....	24
Figure I.21: Retrait de dessiccation des BAP t des bétons traditionnels de même rapport E/C	25
Figure I.22: variation de la masse des échantillons immergés dans la solution du sulfate de sodium (bétons de classe 50 MPa) [56].	32
Figure I.23: Différences de variation de masse entre éprouvettes soumis à l'attaque du sulfate de sodium et éprouvettes témoins (classe 50 MPa) [56].	33

Figure I.24: Evolution des déformations, différence entre le milieu témoin et le milieu sulfatique (bétons de classe 50 MPa) [56].	33
Figure I.25: Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% Na₂SO₄, classe 50 MPa [56].	34
Figure I.26: Diagramme des équilibres thermodynamiques à 20°C des phases hydratées du ciment avec le CO₂.	36
Figure I.27: Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée des bétons de classe 50 MPa [56].	38
Figure I.28: Diagramme de Keil (Zone des pouzzolanes dans le système	48
Figure I.29 : Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins [74].	55
Figure I.30 : engin mécanique de dragage [73].	56
Figure I.31 : Evolution de la résistance en compression en fonction du temps	58
Figure I.32 : Situation donnée par satellite du barrage Chorfa II.	59
Figure I.33 : Vue générale du barrage Chorfa II	59
Figure I.34 : Vue du coté interne de la digue du barrage Chorfa II.	60
Figure I.35 : La digue du barrage Chorfa II.	60

Figures de la Partie II

_Toc306117407

Figure II.1: La pouzzolane naturelle utilisée, avant broyage et après broyage.	69
Figure II.2: Four de calcination utilisé (+ 1200°C).	71
Figure II.3: La vase de Chorfa a l'état naturel, séchée, broyée, tamisée, et calcinée	72
Figure II.4: Pycnomètre de Le Châtelier.	73
Figure II.5: Essais de consistance normale et de prise par l'appareil de Vicat	73
Figure II.6: Perméabilimètre de Blaine automatique et manuel de la cimenterie LAFARGE.	74
Figure II.7: L'appareil de l'analyse granulométrique des fines.	75
Figure II.8: Courbes granulométriques de la vase Chorfa et de la pouzzolane naturelle utilisées	76
Figure II.9: Courbes granulométriques des sables de mer, de carrière et graviers (3/8), (8/15).	78
Figure II.10: Organigramme résumant le travail expérimental mené dans cette étude.	80

Figure II.11: Organigramme des séquences de malaxage des BAP	84
Figure II.12: Paramètres de l'essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow).....	85
Figure II.13: Paramètres de l'essai de la boîte en L.....	86
Figure II.14: Paramètres de l'essai J-Ring	86
Figure II.15: La presse utilisée pour les écrasements	88
Figure II.16: Presse munie d'un dispositif de flexion 3 points.....	88
Figure II.17: Schéma de l'essai de traction par flexion 3 points.....	89
Figure II.18: Eprouvtes d'essais immergées dans une solution sulfatique.....	90
Figure II.19: Pesée d'une éprouvette de béton	91
Figure II.20: Rétractomètre pour la mesure du gonflement sur une éprouvette de béton 7x7x28 cm³.....	92
Figure II.21: Schémas et enceinte de la carbonatation accélérée.....	93

Figures de la Partie III

Figure III.1: Aspect de la galette d'étalement.....	96
Figure III.2: Aspect de l'essai de la boîte en L.....	96
Figure III.3: Aspect de l'essai de la stabilité au tamis.....	97
Figure III.4: Aspect de l'essai J-Ring	98
Figure III.5: Observation de la répartition des granulats	99
Figure III.6: évolution des résistances mécanique à la compression du BAP-PZ et du BAP-V en fonction du temps.	100
Figure III.7: évolution des résistances mécanique à la traction du BAP-PZ et du BAP-V en fonction du temps.....	101

<u>Figure III.8: Variation de la masse des échantillons immergés dans l'eau douce</u>	103
Figure III.9: Evolution des déformations des deux BAP après immersion dans l'eau douce	104
Figure III.10: évolution Evolution de la masse des éprouvettes du BAP immergées dans des solutions sulfatiques en fonction du temps.	107
Figure III.11: Différences de variation de masse entre éprouvettes soumises à l'attaque des sulfates et éprouvettes témoins	108
Figure III.12: Evolution des déformations après immersion dans les solutions sulfatiques	109
Figure III.13: des déformations, différence entre le milieu témoin et les milieux sulfatiques	110
Figure III.14: évolution des résistances a la compression des deux BAP immergés dans les deux solutions sulfatiques et l'eau douce.	112
Figure III.15: évolution des résistances a la compression des deux BAP dans les solutions sulfatiques par rapport a celles dans l'eau douce	113
Figure III.16: Etats des surfaces des éprouvettes des BAP immergées dans différents milieux.	114
Figure III.17: Fronts de carbonatation visualisés par pulvérisation à la phénolphtaléine	115
Figure III.18 : Profondeur de carbonatation en fonction du temps d'exposition au CO₂ (50% volumique).	116

Liste des tableaux

Tableaux de la Partie I

<i>Tableau I.1: Domaine élargi des compositions des pouzzolanes.....</i>	<i>47</i>
<i>Tableau I.2 : Classes granulométriques d'un matériau [72].....</i>	<i>55</i>

Tableaux de la Partie II

<i>Tableau II.1: Composition chimique du ciment utilisé</i>	<i>66</i>
<i>Tableau II. 2: Composition minéralogique du clinker</i>	<i>67</i>
<i>Tableau II.3: Caractéristiques physiques du CPA CEM1 42.5.</i>	<i>67</i>
<i>Tableau II.4: Caractéristiques mécaniques du mortier normal du ciment CEMI 42.5. ..</i>	<i>68</i>
<i>Tableau II.5: Analyse chimique de la pouzzolane naturelle utilisée [56].....</i>	<i>70</i>
<i>Tableau II.6: Caractéristiques chimiques de la vase calcinée.....</i>	<i>72</i>
<i>Tableau II.7: Valeurs des résistances à la traction et compression des mortiers normaux à base de pouzzolane et de vase calcinée.</i>	<i>74</i>
<i>Tableau II.8: Récapitulatif des caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle et la vase calcinée Chorfa II.....</i>	<i>75</i>
<i>Tableau II.9: Caractéristiques du superplastifiant MEDAFLOW 113</i>	<i>76</i>
<i>Tableau II.10: Constituants utilisés du squelette granulaire</i>	<i>77</i>
<i>Tableau II.11: Récapitulatif des caractéristiques physiques des sables et graviers utilisés</i>	<i>77</i>
<i>Tableau II.12: Analyse chimique du sable de mer de Sidi-Lakhdar et des granulats de Kristel</i>	<i>78</i>
<i>Tableau II.13: Compositions des deux BAP d'étude</i>	<i>82</i>
<i>Tableau II.14: Caractéristiques des deux BAP</i>	<i>83</i>

Tableaux de la Partie III

<i>Tableau III.13: Récapitulatif des résultats de caractérisation des deux BAP à l'état frais.</i>	<i>98</i>
---	-----------

Introduction générale

L'un des ennemis pervers des barrages au monde est l'envasement ou ce que les experts appellent « l'ennemi silencieux » et qui cause annuellement, selon la banque mondiale, un préjudice avoisinant le 1% du coût global de l'investissement. En effet, toutes les études ont montrées que ce phénomène produit un dépôt de vase de l'ordre de 4,5 milliards de mètres cubes, ce qui réduit les capacités de stockage des barrages d'environ 11%. Cependant, ce taux est encore plus important concernant les barrages algériens [63].

En Algérie les questions liées aux dragages se rapportent principalement au coût de ces opérations, mais qui demeurent néanmoins indispensables. Toutefois, cette solution n'est pas épargnée de se retrouver confrontée à un sérieux problème d'élimination des quantités de vase draguées. Ce même problème a été le précurseur de la politique de valorisation qui contribue certainement à l'amortissement des coûts liés au dévasement et à préserver l'environnement.

Le parallélisme entre l'accroissement de la nécessité de dévasement et l'intérêt que porte la recherche aux bétons autoplaçants met en évidence l'idée de la valorisation des vases draguées après traitement dans la composition des BAP et qui semble être une voie prometteuse, si on considère l'intérêt mutuelle qui porte sur les avantages bilatéraux.

En effet, la technologie des bétons autoplaçants est capable de consommer d'énormes quantités de vase, qui à son tour pourrait apporter et/ou améliorer des caractéristiques et performances de ce type de bétons.

La caractérisation physico-chimique et minéralogique de la fraction solide des vases extraites du barrage de Chorfa II a donnée plus de crédibilité à cette voie de valorisation en tant que matière première dans le secteur du génie civil.

C'est pourquoi, nous avons entamé cette étude dans un but écologique et technique en valorisant la vase traitée thermiquement comme étant un matériau de construction substituable en partie au ciment. Ceci passe par une étude de l'influence de la vase sur le comportement physico-mécanique et de durabilité des BAP.

Ce travail sera présenté sous trois parties :

La première partie de cette thèse est consacrée à l'étude bibliographique. Cette étude est composée de trois chapitres. Dans le premier, nous présentons des généralités sur les bétons autoplaçants ainsi que les méthodes de caractérisation des différentes propriétés de ce type de béton. Dans le deuxième chapitre nous avons abordé les facteurs affectant la durabilité des BAP et l'effet des ajouts minéraux sur les différentes propriétés de durabilité des bétons. Les recherches publiées concernant l'influence du type d'addition minérale sur les propriétés de durabilité des BAP sont également présentés dans ce chapitre. Ensuite, dans le troisième chapitre nous avons évoqué la valorisation des différents déchets minéraux et

en particulier la pouzzolane naturelle de Beni-Saf (ouest algérien) et sa valorisation dans le béton autoplaçant et nous avons également évoqué le phénomène d'envasement affectant le barrage de Chorfa II ainsi que les possibilités de valorisation de la vase issue de ce barrage dans la technologie des BAP.

La deuxième partie décrit les matériaux utilisés et la formulation du BAP adoptée au cours de nos travaux, elle est composée de deux chapitres. Dans le premier chapitre, deux bétons ont été formulés à partir des mêmes constituants, avec le même squelette granulaire et un rapport $E/L_{\text{équi}}$ identique. Dans le deuxième chapitre, sont présentées, les méthodes d'essais qui nous ont permis de mesurer des grandeurs physico-mécaniques (résistance à la compression, à la traction et à la ségrégation) et de durabilité (résistance aux attaques des sulfates de sodium (Na_2SO_4) et de magnésium (MgSO_4), et carbonatation accélérée et naturelle) à partir desquelles nous avons analysé l'effet de la vase en tant que substitut minéral au ciment dans les BAP.

La troisième partie présente les résultats et les analyses de la campagne expérimentale menée sur les deux formulations de BAP. Cette partie comporte trois chapitres. Le premier est consacré aux propriétés des BAP à l'état frais. Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les résultats relatifs aux propriétés mécaniques à l'état durci et dans le troisième chapitre nous avons présenté les résultats relatifs aux propriétés de durabilité des bétons étudiés.

Enfin, une conclusion générale sur notre étude ainsi que d'éventuelles perspectives pour la clôture de cette thèse.

Partie I:

Etude bibliographique

Chapitre I :
**Généralités sur les bétons
autoplaçants**

Chapitre I : Généralités sur les bétons autoplaçants

I.1 INTRODUCTION

Le béton autoplaçant BAP, ou SCC, en anglais, (pour self-compacting concrete) par définition, est un béton très fluide, homogène et stable, qui se caractérise par sa rapidité de mise en place sous l'effet de son poids propre sans apport de vibration externe ou interne.

En effet, les bétons ordinaires subissent une réduction de leur ouvrabilité lors du transport et de la mise en œuvre et nécessitent, en général, un apport d'énergie (sous la forme d'une vibration interne ou externe) permettant d'évacuer l'air emprisonné dans le matériau. Les bétons ordinaires de consistance fluide peuvent, dans certains cas, être mis en œuvre sans vibration mais les règlements prennent en compte alors une qualité amoindrie à l'état durci [1].

Les BAP ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers, l'absence de nuisances sonores en milieu urbain, et la possibilité de bétonnage des zones fortement ferraillées, à géométrie complexe ou difficilement accessibles. En effet, le risque de blocage peut être réduit en optimisant les mélanges avec une viscosité adéquate. Ceci permet d'assurer une bonne suspension aux particules solides durant l'écoulement. Cela peut se faire en réduisant le rapport eau/pâte et/ou en incorporant un dosage adéquat en superplastifiant.

Selon Khayat (1999), le BAP doit assurer le compromis entre deux propriétés tout à fait contradictoires : une haute fluidité et une haute stabilité, Ce qui distingue véritablement les BAP des bétons fluides ordinaires.

En plus, les BAP présentent d'autres avantages qui justifient l'intérêt de leur utilisation [2] :

- Élimination du besoin de vibration et les nuisances sonores;
- Réduction du temps de travail;
- Amélioration du fait de la stabilité de la matrice, de la qualité de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats ou les armatures;

- Amélioration de la qualité d'adhérence à l'interface entre un ancien béton et le BAP de réparation;
- Après l'élimination des couches du béton endommagé de l'élément structural en le remplaçant par une couche de BAP de réparation, une diminution de la perméabilité et par conséquent, une amélioration de la durabilité peut être observée sur cet élément structural.
- Modifications des outils de fabrication (outils de mise en place).
- La qualité des parements est remarquablement améliorée avec l'utilisation des BAP.

Cependant, malgré les aspects intéressants qu'ils proposent, en particulier à l'état frais, et leur utilisation en constante augmentation dans les autres pays du monde, les BAP ne disposent pas encore du recueil nécessaire et suffisant pour être acceptés et a la fois adopté par tous les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre ce qui limite encore leur diffusion en Algérie. Ce retour d'expérience, dont bénéficient les bétons vibrés (BV) employés jusqu'ici, est essentiel pour le comportement (mécanique et autre) à long terme des BAP. De plus, la nécessité actuelle de trouver de nouvelles solutions techniques respectant le développement durable amène à étudier le caractère vieillissant du béton autoplaçant.

L'action menée dans cette synthèse bibliographique est de répertorier et de synthétiser les documents existants qui touchaient de près ou de loin aux BAP ainsi qu'à leurs propriétés.

Le premier chapitre présente des généralités sur les BAP.

Le deuxième chapitre présente les propriétés physico-chimiques et durabilité chimique du BAP

Le troisième chapitre présente les différents matériaux valorisables dans les BAP.

Enfin une conclusion générale clôture cette recherche bibliographique, suivi de la problématique et des objectifs de cette recherche.

I.2 CARACTÉRISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS

Les bétons autoplaçants, bétons très fluides, homogènes et stables, mis en place sans apport de vibration même dans des structures complexes et fortement ferraiillées, ont des caractéristiques et des comportements à l'état frais qui se différencient de ceux d'un béton ordinaire vibré (BOV). Leur ouvrabilité se décline classiquement suivant : leur mobilité en milieu non confiné, leur mobilité en milieu confiné et leur stabilité (vis-à-vis de la ségréga-

tion et du ressuage) [3]. La caractérisation de tels bétons est donc plus complexe que celle des bétons traditionnels et implique des essais spécifiques.

Des recommandations de caractérisation ont été préconisées par l'Association Française de Génie Civil (AFGC) (2000). D'abord provisoires, ces recommandations sont devenues in situ les essais de référence pour valider une formulation de BAP.

I.2.1 Essai d'étalement (Slump flow)

C'est l'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant de caractériser la mobilité en milieu non confiné. L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton. C'est une variante de l'essai d'affaissement sur cône d'Abrams qui consiste à mesurer (en utilisant le même matériel) le diamètre d'étalement de la galette de béton sur deux côtés perpendiculaires. Les valeurs sont relevées en millimètres (Figure I.1).

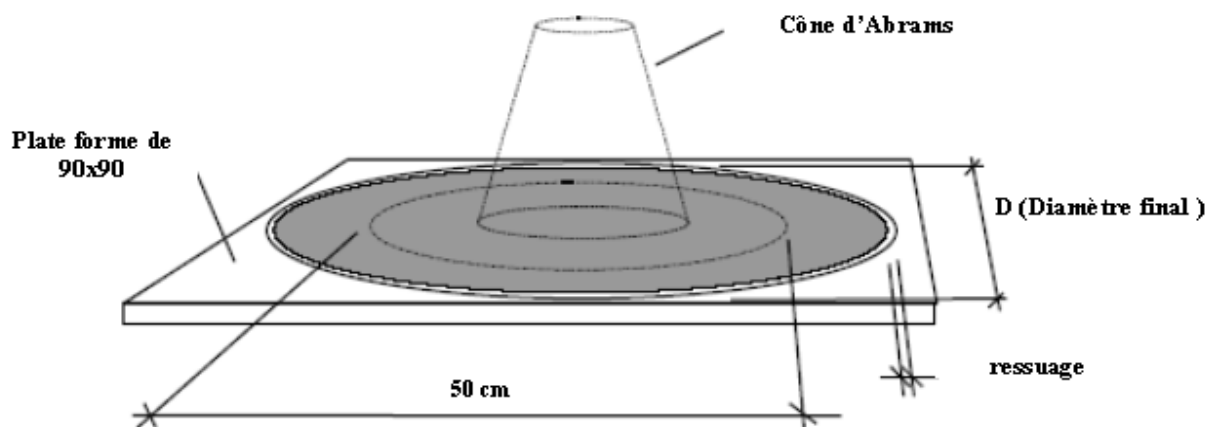


Figure I.1: Essai d'étalement au cône (slump flow)

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 [4].

La vitesse d'étalement du béton est également une indication souvent prise en compte (t_{50} : temps pour atteindre une galette de diamètre 50 cm).

I.2.2 Essai J-Ring (Essai des anneaux japonais)

Cet essai consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armatures afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. Le béton s'écoule à partir du cône disposé

au centre d'un anneau métallique (Figure I.2). On caractérise donc la tendance à la ségrégation et l'enrobage d'armatures. De plus, la répartition des granulats doit être homogène.

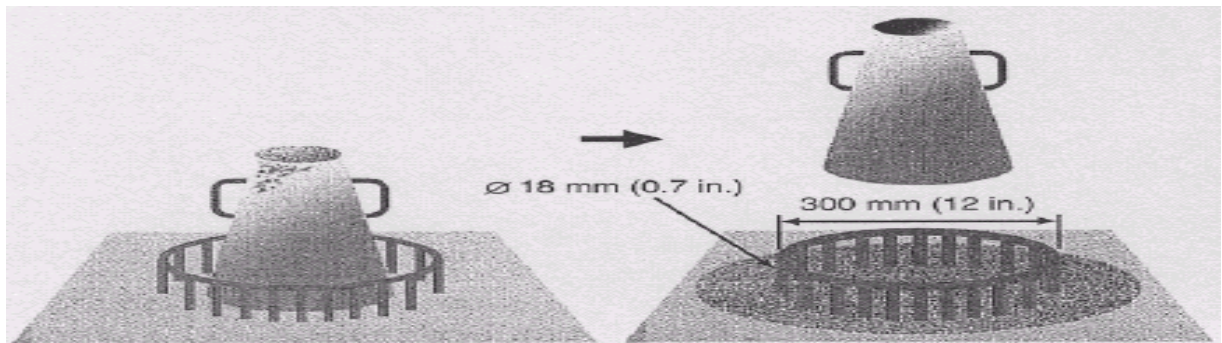


Figure I-2 : J-Ring (Anneau Japonais)

Le cône est placé sur une plaque plane, entourée par un anneau de 300 mm de diamètre, équipé de 16 barres HA de diamètre 16 mm (figure I-2). Une fois le cône rempli, on sou-lève, ce qui laisse écouler le béton à travers les barres HA, on mesure en fin d'essai le dia-mètre de la galette obtenue. D'autres essais peuvent être tirés du même essai : le temps mis par le béton pour dépasser le diamètre de 500 mm T50 en secondes, et la différence d'épaisseur de la galette à l'intérieur de l'anneau et à l'extérieur de ce dernier [5].

I.2.3 Essai de la boîte en L

Cet essai permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des arma-tures. Le schéma de la boîte ainsi que le principe de l'essai sont décrits sur la figure I.3.

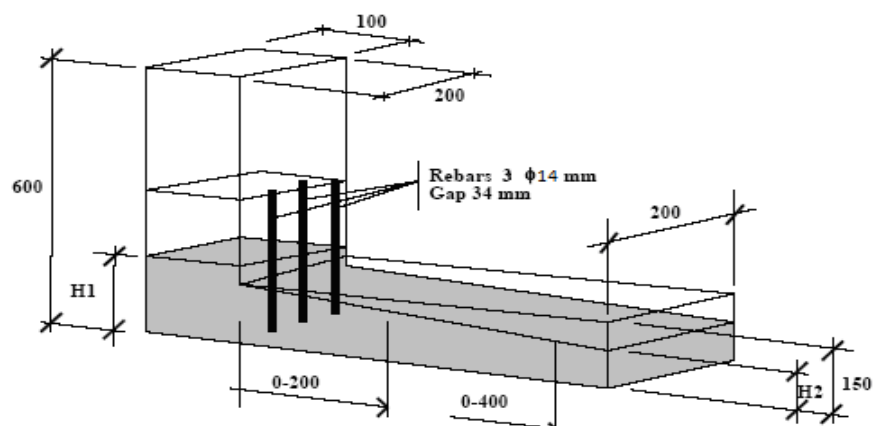


Figure I.1: Essai de la boîte en L

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement on laisse le béton reposer pendant une minute. On lève la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers un ferrailage standard qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (34 mm d'espace libre entre 2 barres) [4].

Une fois l'écoulement terminé, on mesure les deux hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage $H2/H1$. Le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur à 0.8.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage ou qu'il y a blocage des granulats, c'est le signe de l'apparition de la ségrégation

Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

I.2.4 Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier [6].

La ségrégation peut être définie comme la séparation des constituants d'un matériau hétérogène de sorte que leur distribution n'est plus uniforme. Dans le cas du béton, ce sont les différences de grosseurs des granulats ainsi que celles des masses volumiques des constituants du béton qui sont la cause principale de la ségrégation. Ainsi, les risques de ségrégation peuvent être contrôlés par le choix d'une granulométrie appropriée et les soins pris lors de la mise en place du béton. La viscosité de la pâte de ciment contrebalance le mouvement descendant des gros éléments. En conséquence, les bétons de faible rapport E/C sont moins sujets à la ségrégation [7].

Il existe deux formes de ségrégation : dans la première forme, les gros éléments tentent de se séparer parce qu'ils ont tendance à se déplacer plus vite ou à se compacter plus rapidement que les grains fins. La seconde forme de ségrégation se produit particulièrement dans les bétons fluides et se manifeste par la séparation de la pâte (ciment et eau) du mélange. L'ajout d'eau améliorerait la cohésion du béton, mais, si celui-ci devient trop fluide, le deuxième type de ségrégation risque de se produire [7].

L'essai de la stabilité au tamis complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (noté P_{LAITANCE} par la suite) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm (figure I.4) [4].

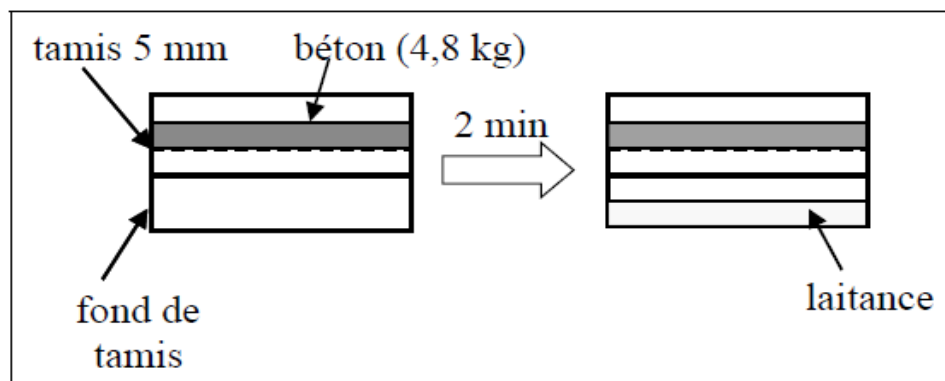


Figure I.4: l'essai de stabilité au tamis [4]

Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant 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).

Les BAP correspondant aux rapports $E/C = 0,4$ et $0,5$ ont un taux de ségrégation inférieur à 15% et un ressage n'excédant pas les 3 % est synonyme d'une stabilité correcte. Les BAP a ($E/C = 0,6$) présente la particularité d'engendrer une mauvaise stabilité vis-à-vis de l'écoulement ce qui paraît logique puisqu'il renferme une plus grande quantité d'eau [8].

Les recherches ont montrées que le ressage diminue lorsque le dosage en fines augmente ($\geq 20\%$), vraisemblablement parce que les particules fines s'hydratent plus rapidement et aussi leur taux de sédimentation est plus faible. Donc les BAP fortement dosés en fines sont moins susceptibles de ressuer [8].

I.2.5 Essai V funnel

Un autre essai permet d'évaluer la mobilité du béton en milieu non confiné comme celui de l'entonnoir en forme de V (V funnel) (Figure I.5).

L'essai d'étalement est généralement relié au seuil d'écoulement du matériau et l'essai V funnel est relié à la viscosité, bien que le seuil d'écoulement soit également mobilisé aux parois du dispositif. Le résultat d'un essai empirique seul n'est, cependant, pas suffisant pour décrire convenablement le comportement du béton.

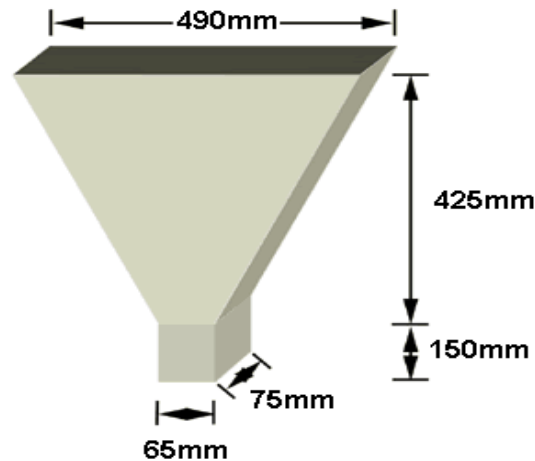


Figure I.5: L'essai V-funnel [9]

Les temps d'écoulement au V-funnel dépendent également du type d'application, mais ne sont regroupés que selon 2 classes [9]

- Classe VF1 : temps d'écoulement inférieur à 10 s
- Classe VF2 : temps d'écoulement compris entre 7 et 27 s

I.2.6 Autres essais de ségrégation

Les essais du tube en U, du caisson et de la passoire permettent aussi de caractériser la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des bétons autoplaçants (figure I-6, figure I-7 et figure I-8) [5].

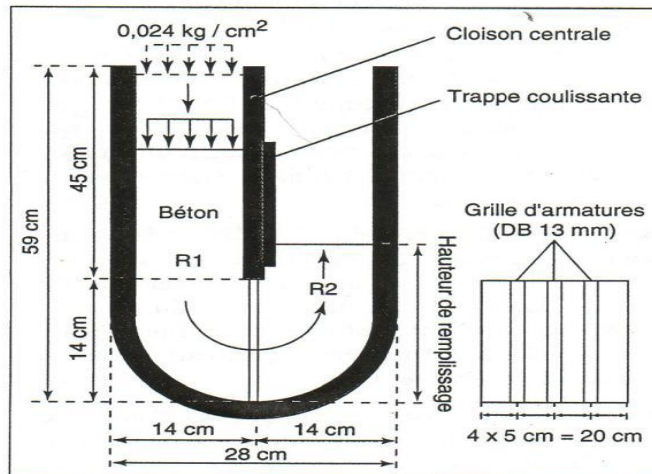


Figure I-6 : Essai du tube en U

Pour un béton, la hauteur de béton dans la partie R2 après remplissage de R1 et retrait de la trappe doit être supérieure à 30cm (Volume initial du béton : 16L).

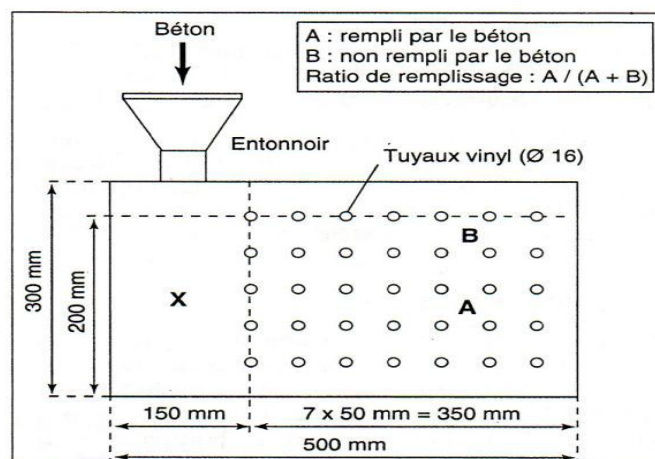


Figure I-7 : Essai du caisson

L'aptitude de remplissage est caractérisée par le ratio $A/(A+B)$ qui doit être supérieur à 60% pour un BAP (volume initial du béton : 35L).

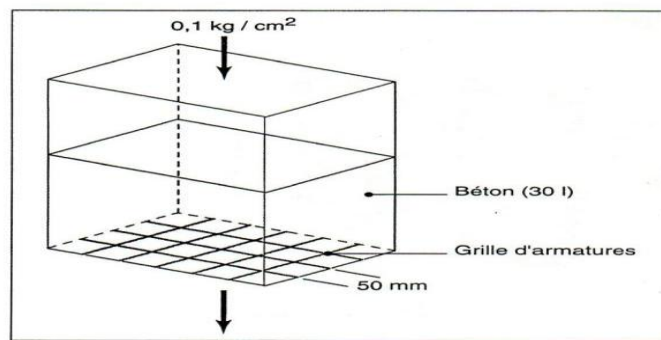


Figure I-8 : Essai de la passoire

La mesure du volume du matériau passant au travers d'une grille d'armatures après retrait de la trappe amovible caractérise le risque de blocage (volume initial du béton : 30L).

I.2.7 Essai de ressuage

Le ressuage est un type spécial de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables.

Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une mince pellicule d'eau à la surface du béton. Selon les conditions météorologiques, on assiste à une compétition entre le débit d'eau ressuée et le débit d'eau évaporée. Si ce dernier est plus faible, le phénomène de ressuage est visible, sinon, la surface du béton au lieu d'être brillante, devient mate. La quantité d'eau ressuée sera de toute façon égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée [10].

La tendance au ressuage dépend pour beaucoup des propriétés du ciment. Le ressuage est diminué par l'augmentation de la finesse du ciment, vraisemblablement parce que les particules fines s'hydratent plus rapidement et aussi parce que leur taux de sédimentation est plus faible.

D'autres propriétés du ciment influencent également le ressuage, à savoir : un fort pourcentage d'alcalis présents dans le ciment, de fortes teneurs en C3A ou lorsque du chlorure de calcium est ajouté, minimisent considérablement le ressuage [7].

Cependant les propriétés du ciment ne sont pas les seuls paramètres pouvant affecter le ressuage du béton. D'autres facteurs doivent aussi être considérés, en particulier la proportion d'éléments très fins (plus petits que 150 μ m), permet une réduction du ressuage. En réalité, lorsque les granulats fins concassés contiennent une quantité importante de maté-

riaux très fins (plus de 15% passant au tamis 150 μ m), le ressuage est diminué, mais les matériaux très fins doivent contenir uniquement de la poussière de concassage et non des particules d'argile [7].

L'ajout de cendres volantes ou de fumée de silice dans le mortier réduit le ressuage de façon significative [11].

Cependant, de très basses températures peuvent faire augmenter le ressuage, probablement parce que le phénomène a plus de temps pour se développer puisque la réaction d'hydratation est ralentie [7].

Les superplastifiants permettent généralement une diminution du ressuage sauf pour le cas d'un étalement très élevé. Cependant, s'ils sont utilisés avec un retardateur, une augmentation du ressuage peut être observée à cause du retard de prise qui donne plus de temps au phénomène de ressuage à se développer [7].

Un ressuage important peut entraîner une dégradation de la qualité esthétique des parements et de la durabilité. La valeur limite de ressuage conseillée doit être inférieure ou égale à 3 ‰ en volume [12].

I.3. MÉTHODES DE FORMULATION DES BAP

Lors de la présentation des principales caractéristiques des BAP, nous avons mis en évidence l'influence des différents constituants et établit certains critères permettant d'obtenir les propriétés visées. Les gammes de valeurs généralement employées sont issues des recommandations provisoires de l'AFGC et présentées ci-dessous [3] :

- ❖ une quantité de pâte élevée (ciment + additions + eau efficace) (40% du volume total)
- ❖ une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/ m³)
- ❖ utilisation d'un superplastifiant (à un dosage proche du dosage à saturation)
- ❖ un faible volume de gravillons (rapport G/S de l'ordre de 1)
- ❖ un diamètre maximal réduit
- ❖ éventuellement utilisation d'un agent viscosant.

- *Volume de gravillon*

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée. Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité du liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée [2].

Ces deux facteurs conduisent généralement 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 [2].

- *L'emploi de superplastifiants*

Les superplastifiants sont des polymères organiques solubles dans l'eau dont la synthèse réalisée par une opération complexe de polymérisation produit de longues chaînes de molécules de masses moléculaires élevées et de ce fait, sont relativement chers.

Les superplastifiants permettent en effet de défloculer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau initialement piégée entre les floccs est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange (Figure I.9). Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place [15].

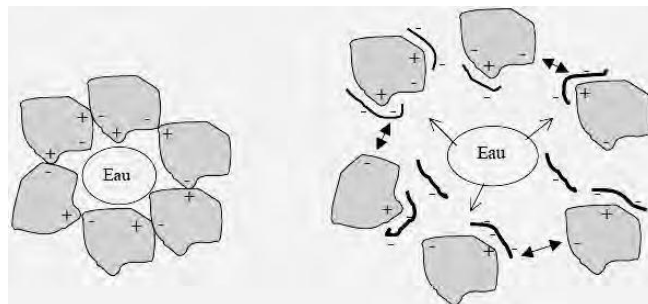


Figure I.9: Action des superplastifiants

- Défloculation des grains de ciment [16]

L'ajout d'un superplastifiant permet ainsi d'augmenter significativement la fluidité des BAP que ce soit du point de vue de leur étalement ou du point de vue de leur seuil d'écoulement (Figure I.10).

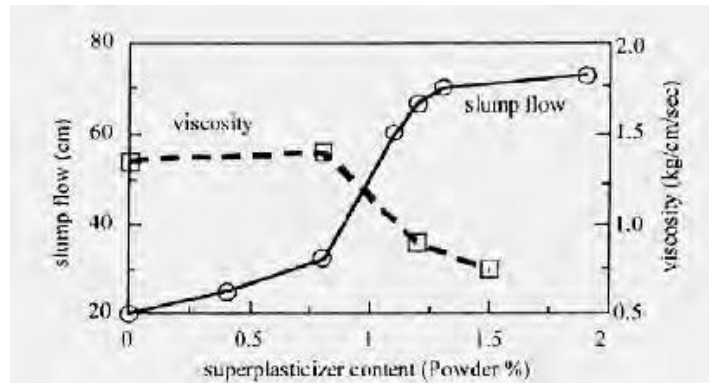


Figure I.10: Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [17].

- **Une quantité d'addition ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante**

Les compositions du BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m^3) 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).

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du béton [18].

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

Deux grandes familles prévalent actuellement :

- ❖ la première concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante ($450 \text{ à } 600 \text{ kg/m}^3$) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation

d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants [19].

- ❖ une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables [20].

Les auteurs s'accordent sur le fait qu'il n'existe pas de méthode de formulation unique car les matériaux employés et leurs qualités diffèrent selon les régions ou les pays.

Quelques méthodes de formulation sont cependant présentées ci-dessous.

1.3.1 Méthode basée sur l'optimisation du mortier

Appelée aussi méthode Japonaise, Elle permet l'obtention de formulation fortement dosée en ciment et conduit à des volumes de pâte importants. Les bétons qui en découlent sont sous dosés en granulats et surdosés en liant et économiquement peu viables.

Okamura et Ozawa sont les précurseurs en matière de formulation des BAP. Les caractéristiques requises sont une capacité de déformation élevée de la pâte et du mortier, ainsi qu'une résistance à la ségrégation lors de l'écoulement en milieu confiné. Leur méthode de formulation se base sur les critères suivants [21] :

- ✓ Une quantité de gravillons limitée.
- ✓ Un rapport Eau/Liant, faible.
- ✓ Utilisation d'un superplastifiant.

Les quantités de gravillons et de sable sont fixées de manière à obtenir facilement les caractéristiques des BAP en n'ajustant que le rapport Eau/Liant et le dosage en superplastifiant. Ainsi, la quantité de gravillons est limitée à 50% de leur compacité (qui est le rapport entre le volume de grains sur le volume total du système grains+vides) afin de minimiser les risques de blocage. Il semblerait que ce rapport soit sécuritaire [6], [22].

La quantité de sable est par ailleurs limitée à 40% du volume du mortier. Les propriétés de la pâte (rapport Eau/Liant et quantité de superplastifiant) sont ensuite optimisées et caractérisées à l'aide d'essais sur mortiers. Un étalement relatif (Γm) est déterminé à l'aide de l'essai au mini-cône et une vitesse d'écoulement relative (Rm) est déterminée par un essai au V-funnel pour mortier :

$$\Gamma = (d^2 - d_0^2) / d_0^2$$

$$Rm = 10/t$$

d^2 est le diamètre de la galette de mortier, d_0 est le diamètre inférieur du cône, et t est le temps d'écoulement du mortier.

Les auteurs ont montré qu'il existait une relation linéaire entre Γm et Rm pour un dosage en superplastifiant donné et quand le rapport Eau/Liant varie. Pour formuler un BAP acceptable, il faut obtenir simultanément $\Gamma m = 5$ et $Rm = 1$ [22, 18].

Edamatsu et Al. Proposent une méthode pour évaluer les interactions entre le sable ou les poudres du mortier et les gros granulats. Ils montrent qu'en faisant varier les paramètres Γm et Rm dans une certaine gamme, le rapport R_{mb}/R_m est constant. R_{mb} est la vitesse d'écoulement relative du béton modèle composé du mortier étudié ainsi que 20% de billes de verre de 10mm de diamètre. A partir de ce rapport, les auteurs déclarent qu'il est possible d'évaluer les interactions entre les gravillons et les particules du mortier (sable ou liant) [23].

I.3.2 Méthode basée sur l'optimisation de la quantité de pâte

Van Bui et Montgomery présentent une méthode de formulation basée sur l'optimisation de la quantité de pâte. Ils montrent que [24] :

- ✓ il existe une quantité de pâte minimum pour éviter les blocages lors de l'écoulement
- ✓ il existe une quantité de pâte minimum pour assurer la maniabilité du mélange.

La quantité de pâte minimum pour éviter les risques de blocage, soit la quantité de granulat maximum est calculée selon l'expression :

$$Vab \text{ max} = \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g) N_g a}{\left(\frac{Vab_n}{\sum P_g v_m \cdot N_g a \cdot \rho_s} \right) + \left(\frac{Vab_m}{\sum P_v s_n \cdot (1 - N_g a) \cdot \rho_g} \right)}$$

avec ρ_g masse volumique des gravillons, ρ_s masse volumique du sable, N_g pourcentage de gros gravillons, P_{vgm} et P_{vgn} rapport entre le volume des gros granulats de classe m (respectivement des granulats fins de classe n) sur le volume total de granulats, V_{abm} et V_{abn} respectivement les volumes bloqués des granulats de classe m et n .

Ils prennent en compte la distance entre armatures (c) et le diamètre d'une fraction granulaire d_i tel que :

$$d_i / D_{ca} = c \quad \text{avec } d_i = M_{i-1} + 3/4(M_i - M_{i-1})$$

M_i et M_{i-1} sont les dimensions des tamis encadrant la classe granulaire.

Par ailleurs, la quantité de pâte minimum requise pour obtenir une certaine fluidité est calculée par :

$$V_{pd \text{ min}} = V_t - \text{Void} / [(D_{ss_{\text{min}}} / D_{av}) + 1]^3$$

I.3.3 Méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire

Le principe de cette formulation a été proposé par De Larrard et développé au LCPC, il se base sur le principe du Modèle d'empilement compressible, MEC, du squelette granulaire, et du fait que la rhéologie du béton dépend de l'arrangement de son squelette granulaire. L'optimisation de la compacité du béton permet de réduire la teneur en eau à ouvrabilité constante. Les modèles développés permettent d'étudier des mélanges de grande étendue granulaire et ainsi de prendre en compte la contribution des différents constituants des bétons [25].

Dans un empilement, si tous les grains sont arrangés de manière optimale, la compacité maximale (γ_i) est atteinte (paramètre également appelé compacité virtuelle dont nous ne donnerons pas l'équation ici). Or dans la pratique, un empilement ne peut pas atteindre cette compacité virtuelle. Un paramètre a été calculé afin de rendre compte de la compacité des mélanges, c'est à dire la compacité des bétons à se mettre en place dans un moule donné, selon un procédé donné. Il est exprimé selon la forme suivante :

$$K' = \sum K'_i = \sum (y_i / \beta_i) / (1/\square - 1/\gamma_i)$$

avec K'_i : indice de serrage de chacune des classes granulaires, y_i est la proportion volumique des grains de diamètre d_i , β_i est la compacité virtuelle des grains de classe i , \square est la compacité réelle du mélange, γ_i est la compacité virtuelle lorsque la classe i est dominante. Bien qu'il n'existe pas de méthode de formulation unique, quelques auteurs ont proposé des approches se basant sur une optimisation du mortier, une optimisation de la quantité de pâte ou une approche granulaire.

I.3.4. Méthode de formulation Chinoise

Dans beaucoup de pays du monde, la méthode japonaise a été adoptée et employée comme un point de départ pour le développement des BAP. Plus récemment SU et AI ont proposés une nouvelle méthode pour composer les BAP, basé au début, sur la compacité des Granulats et, puis, sur le remplissage des vides des granulats avec la pate [26].

Cette méthode, comparée à la méthode japonaise, est plus simple, plus facile pour l'exécution et sauve le cout.

➤ **Etape 01** : Calcul du dosage des granulats

Le facteur de compacité PF «Packing Factor» des granulats est défini comme la proportion de la masse des granulats des le cas bien rempli dans un BAP que dans moins rempli. Le paramètre PF influe sur la teneur des granulats où une grande valeur de PF peut impliquer une forte teneur de gros et de fins granulats utilisés. Par conséquent, la compacité du BAP et sa résistance à la compression seront réduites.

La proportion de gros et de fins granulats peut être calculée par les deux équations suivantes :

$$M_g = PF \times \rho_{gL} (1 - \frac{S}{G})$$

$$M_s = PF \times \rho_{sL} \times \frac{S}{G}$$

M_g : proportion de gros granulats (Kg/m^3)

M_s : proportion des granulats fins (Kg/m^3)

ρ_{gL} : masse volumique apparente des gros granulats (Kg/m^3)

ρ_{sL} : masse volumique apparente des granulats fins (Kg/m^3)

S/G : volume de proportion des petits granulats sur le volume total de granulats (50% et 57%)

➤ **Etape 2** : Calcul du dosage de ciment

« Guide to construction of high flowing concrete 98 » utilise un dosage en ciment entre 270 et 290 Kg/m^3 . En général les recommandations en Taiwan imposent pour les BHP ou les BAP une résistance à la compression égale a 20psi 0,14 Mpa/Kg de ciment. Donc le dosage en ciment est définit comme : $C = \sigma'_c / 20$ où C : Dosage du ciment en (Kg/m^3)

σ'_c : Résistance a la compression en (psi)

➤ **Etape 3** : Calcul du dosage en eau

Le calcul de la quantité d'eau est basé sur la connaissance du rapport E/C déterminé expérimentalement à travers des essais de compression et généralement estimé à $E/C = 0,43$ de la demande d'eau des additions fines et du dosage du superplastifiant estimé selon les données de la littérature.

L'ajustement des proportions du mélange doit être fait jusqu'à ce que notre béton satisfasse aux conditions de qualification d'un BAP. Par exemple, quand le BAP présente une maniabilité faible, la valeur du PF améliore l'ouvrabilité.

I.4. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU BÉTON DURCI

Les particularités de composition des bétons autoplaçants 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.

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition [27].

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 (module, retrait, fluage) dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait [28].

I.4.1. Résistance mécanique

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [29]. 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 [30].

Différentes données ont été publiées [31], [32]. 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 1.11).

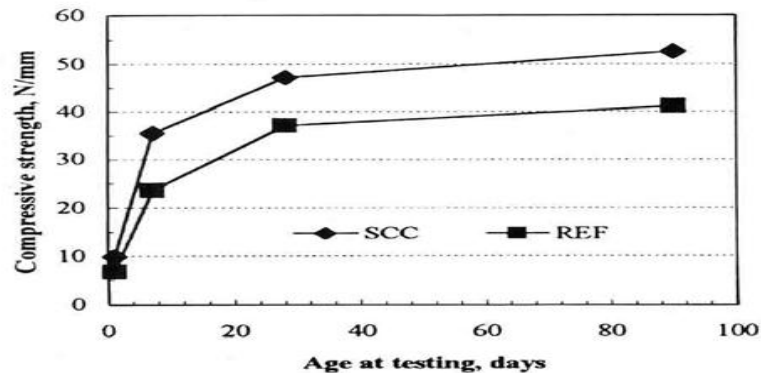


Figure 1.11 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV correspondant [32].

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 1.12). Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours [33].

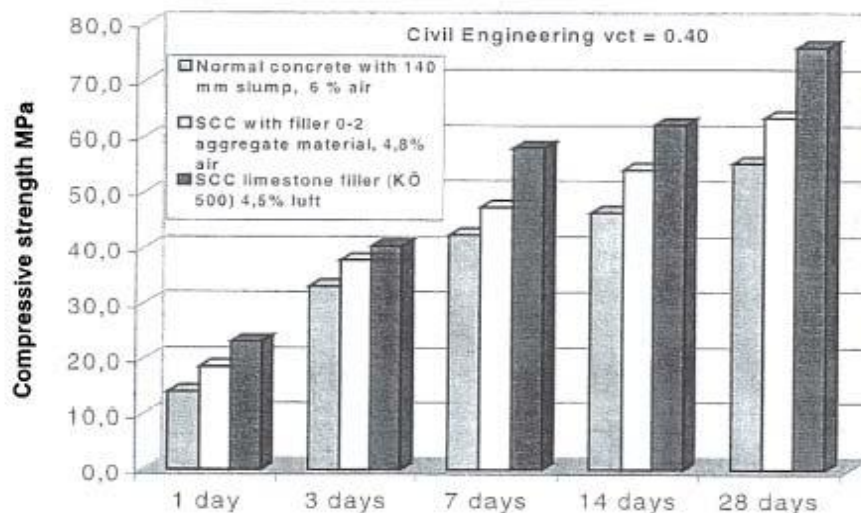


Figure 1.12 : Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP (de formulation différente) [33]

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 [34].

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 [35].

I.4.2 Module d'élasticité (en compression) :

Si on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{Cj}^{1/3}$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré. Or, si ceci est vrai dans certains cas à la précision des mesures près [36], [4] d'autres auteurs indiquent que les modules des BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés [37], [38].

Leur volume de pâte plus élevé peut expliquer ce phénomène. En effet, dans un béton formulé avec des granulats classiques, le module de la matrice (6000-25000 MPa) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats E_g (60000 à 100000 MPa).

A partir d'un calcul prenant en compte le volume respectif des différentes phases (pâte, granulats), les modules résultants peuvent être comparés aux prévisions réglementaires [27] (voir Figure I.13).

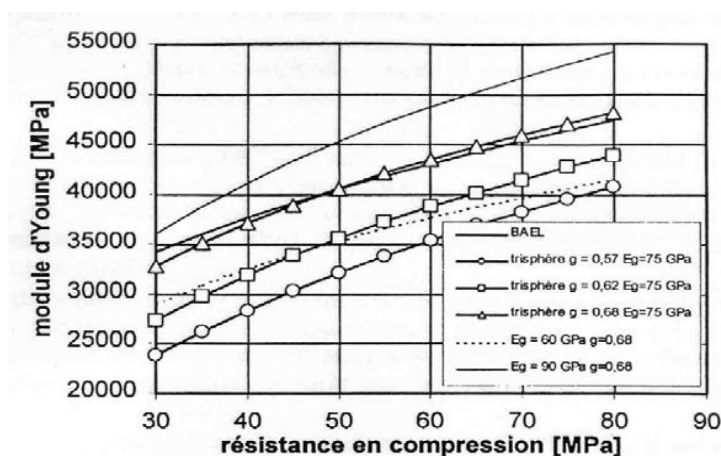


Figure I.13 : Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [27].

Ainsi, pour des caractéristiques représentatives des bétons courants, à savoir un module E_g de 75000 MPa et une proportion de granulats (g) de 68%, les résultats sont très proches des valeurs prédites par le BAEL.

Par contre, lorsque les proportions granulaires sont plus faibles (57%), ce qui est le cas pour les BAP, le module calculé est plus faible de 7000 à 9000 MPa que celui prévu par le règlement, soit une diminution relative de 15 à 30%. Ces écarts deviennent deux fois moins

importants pour une proportion moyenne de granulats ($g = 62\%$) puisque les modules sont inférieurs aux prévisions du règlement de 7 à 20% [28] (figure 1.14).

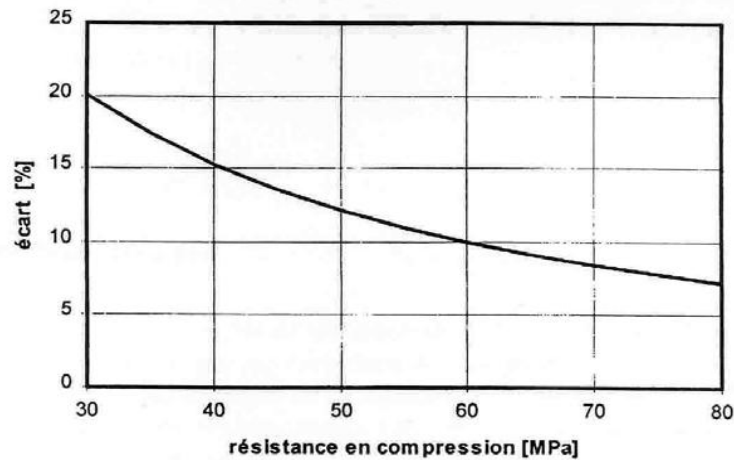


Figure I.14 : Ecart relatif du module des BAP ($g = 62\%$, $E_g = 75$ GPa) par rapport aux prévisions du BAEL [28].

I.4.3 Retrait (état frais, état durci)

a. Retrait plastique

Pour les déformations au jeune âge, autrement dit le retrait plastique, plusieurs travaux se sont attachés à les expliciter en étudiant notamment les différences potentielles de comportement entre BAP et béton vibré [39], [40]. Les premiers auteurs observent des retraits plastiques deux à trois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés (voir figure 1.15). L'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons vibrés [40] (figure 1.16).

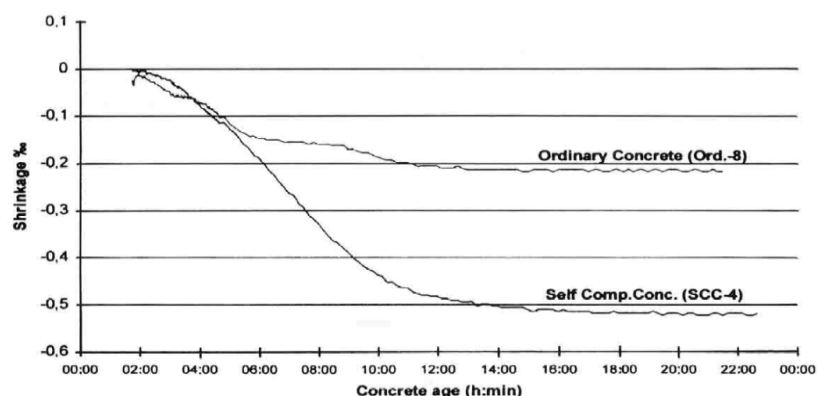


Figure I.15 : Retrait plastique de BAP et béton vibré de structure ($T = 20^\circ\text{C}$, 50% HR) [39]

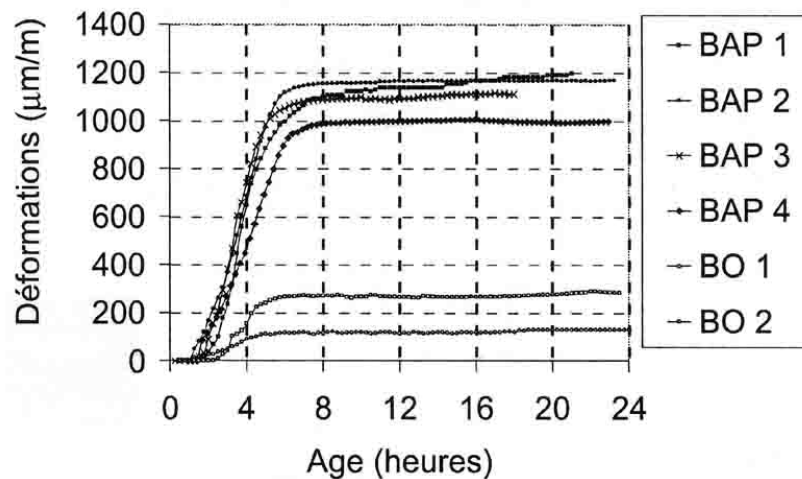


Figure I.17 : Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés dérivés [40].

Ces différences semblent pouvoir s'expliquer par deux paramètres de formulation qui changent d'un type de béton à l'autre : un rapport eau/fines (E/F) plus faible pour les BAP et un dosage en superplastifiant des BAP plus fort qui retarde leur prise. Par conséquent, pour minimiser ce retrait plastique, il est préférable de choisir une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant. Selon ces mêmes données, les fillers calcaires employés dans certaines proportions n'ont presque pas d'effet sur le retrait plastique.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de la protection du séchage des BAP pour des applications horizontales (produit de cure, etc.) afin de contrôler la fissuration plastique qui peut en résulter. Celle-ci est souvent peu nuisible en elle-même mais fournit des amorces de fissures au retrait d'après prise et peut ainsi menacer la durabilité de la structure concernée.

b. Retrait endogène

En ce qui concerne le retrait endogène, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés. En effet, même si certains auteurs attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés (voir figure 1.17), d'autres contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton. [41]

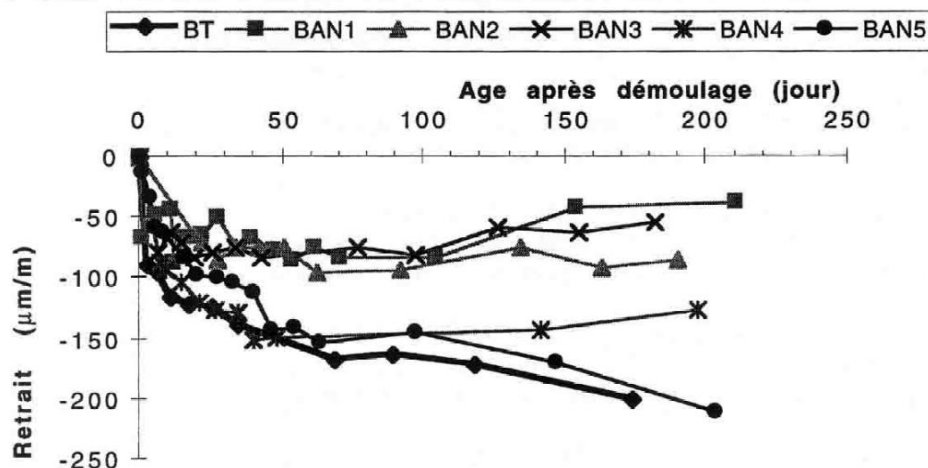


Figure I.17 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP [41]

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés [4].

Les BAP sont sujets à des déformations libres (retraits endogène et de dessiccation) équivalentes à celles des bétons vibrés pour un grand domaine de résistance (figure 1.18) [42].

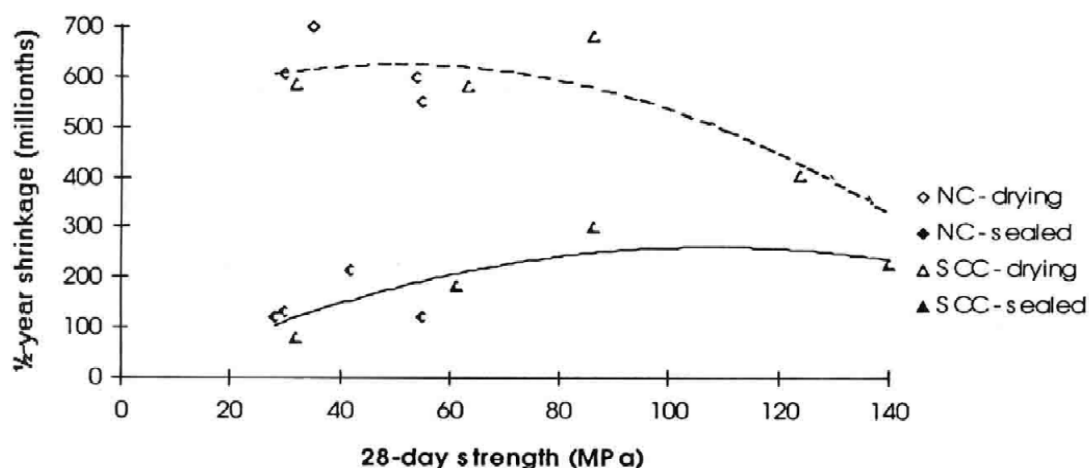


Figure I.18 : Retraits endogènes et de dessiccation (à 180 jours) de divers bétons vibrés (NC) et BAP (SCC) en fonction de la résistance mécanique à 28 jours [42].

C. Retrait de dessiccation

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs [41] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés (figure 1.19). Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé.

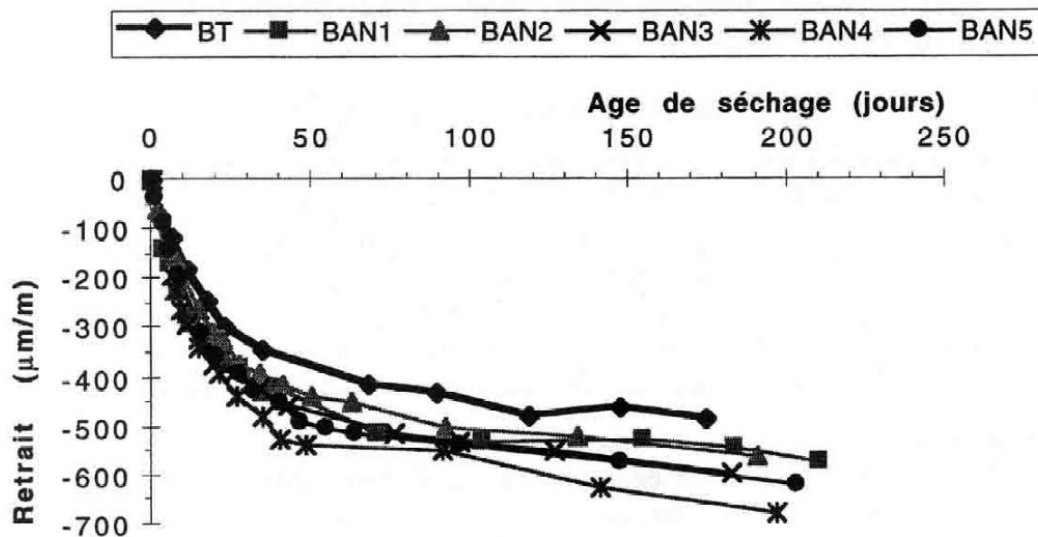


Figure 1.19 : Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP [41].

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [42], [43]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 $\mu\text{m/m}$ (à 180 jours).

Enfin, d'autres auteurs [32] observent des retraits de séchage des BAP moins importants que ceux des bétons vibrés auxquels ils sont comparés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). Le phénomène est attribué à l'effet du volume de pâte et au rapport E/L car, l'augmentation de volume de pâte pour une même quantité d'eau et la diminution de rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage [44] (figure 1.20).

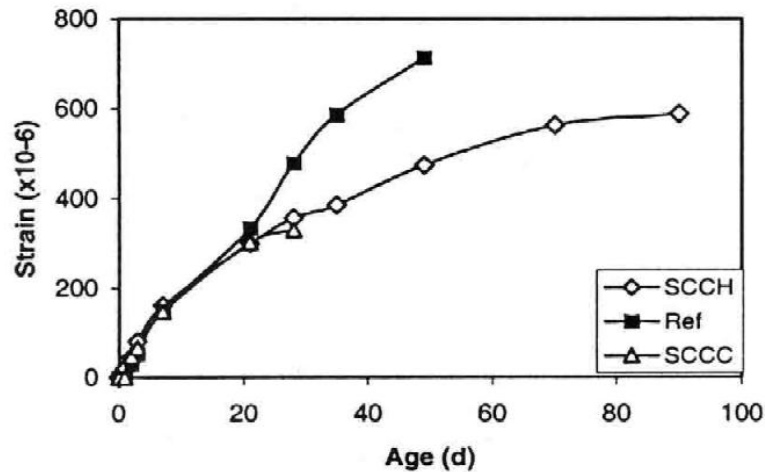


Figure 1.20 : Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant

Le retrait de dessiccation provient de l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du béton vers le milieu extérieur. Le dessèchement est d'autant plus fort que la quantité d'eau initiale dans le matériau est grande et les tensions créées par cette perte en eau s'amplifient également. Contrairement au retrait endogène, le retrait de dessiccation décroît donc avec la diminution du rapport E/C et les BAP ne font pas exception à cette règle (figure 1.21).

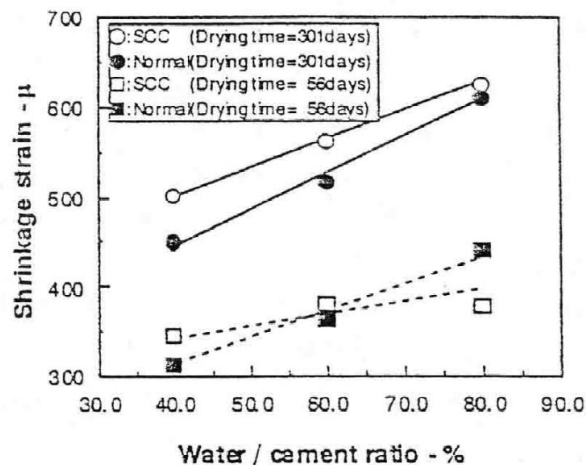


Figure 1.21: Retrait de dessiccation des BAP (SCC) et des bétons traditionnels de même rapport E/C

Enfin, étant donné sa présence fréquente dans les BAP, il est intéressant de connaître l'effet du filler calcaire sur le retrait de ces bétons. 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 [45]. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée [46].

I.5. MISE EN OEUVRE DES BAP

On peut résumer à trois les modes de mise en place des bétons autoplaçants dans des coffrages :

1. Le premier consiste à déverser le béton par le haut du coffrage. Cette technique traditionnelle, commune aux bétons courants, a plusieurs inconvénients. Tout d'abord, elle augmente les phénomènes de ségrégation du béton dus à sa chute dans les coffrages. Ensuite, elle favorise la présence de bulles et de taches sur le parement et accentue le lessivage de l'agent de décoffrage utilisé. Il convient donc de réduire le plus possible la hauteur de chute pour améliorer la qualité d'aspect des parements.
2. Le deuxième se fait par l'intermédiaire d'un tube plongeur introduit depuis le haut du coffrage. Cette méthode a pour avantage de limiter les effets de la chute du béton frais dans les coffrages et est utilisée pour les éléments verticaux de grande hauteur.
3. Le troisième correspond à l'injection du béton par le bas de la banche à l'aide d'une pompe. Ce procédé évite la chute du béton, diminue la présence de bulles sur le parement et favorise l'auto-nivellement, mais nécessite une adaptation des banches et la présence d'une pompe (ce qui libère en contrepartie la grue).

Quelle que soit la méthode de mise en œuvre choisie parmi ces trois, la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages doit être réduite pour éviter la ségrégation dynamique du béton. Il est recommandé de limiter cette longueur à un maximum de 10 m.

D'autre part, des précautions de mise en œuvre des BAP concernent l'étanchéité des coffrages dont il faut colmater les ouvertures vis-à-vis des pertes éventuelles de laitance (précautions identiques à celles pratiquées pour les bétons fluides classiques).

Enfin, les cures post-bétonnage des BAP sont essentielles pour limiter l'évaporation, étant donné la sensibilité de ces derniers au retrait plastique due à leur faible ressuage.

I.6. CONCLUSION

Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel, comme l'ont montré un certain nombre d'exemples. Cependant, leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière. Parmi les propriétés des BAP qui ont été abordées dans ce chapitre, nous soulignons trois de leurs importantes caractéristiques : le volume limité de gravillon, l'emploi de superplastifiants et l'utilisation d'une quantité importante d'addition ($\emptyset < 80 \mu\text{m}$).

Pour palier aux exigences des différentes méthodes de formulations des BAP, nous adopterons directement une formule élaborée par Dr Bouhamou [8], formule non couteuse et basée sur les approches récurrentes citées dans la littérature.

Vu l'important volume de l'ajout minéral, il semble nécessaire de donner une perspective particulière à ce sujet. Par conséquent, dans notre programme de recherche, nous avons tracé comme objectif l'étude de l'influence de la vase calcinée en tant que pouzzolane synthèse sur le comportement mécanique des BAP et leur durabilité vis-à-vis des attaques sulfatiques et de la carbonatation accélérée.

Chapitre II :
Durabilité des bétons autoplaçants

Chapitre II : Durabilité des BAP

II.1. INTRODUCTION

Suite aux caractéristiques mécaniques présentées dans le chapitre précédent, d'autres propriétés des bétons non moins importantes sont ceux de la durabilité. En effet, bien que la résistance mécanique ait été choisie comme critère d'équivalence entre les divers bétons, l'aboutissement de cette étude concerne l'estimation de la durabilité des bétons autoplaçants. Cette durabilité peut être altérée par diverses actions physiques ou chimiques néfastes qui font intervenir l'écoulement de fluides (liquides ou gaz) à travers le béton. Par conséquent, la caractérisation dimensionnelle et la comparaison des BAP avec les bétons vibrés nécessitent la détermination de certaines propriétés physico-chimiques.

Le mécanisme de dégradation chimique du béton consiste à une décalcification progressive du béton au cours du temps en contact avec un environnement agressif. Cette dégradation provoque une augmentation de la porosité du béton qui modifie ces propriétés physico-chimiques et mécaniques. D'une part cette augmentation de porosité accélère le processus de transport (perméabilité ou diffusion) de matières et entraîne une accélération de la dissolution des hydrates (notamment la portlandite). D'autre part, ceci induit une modification des propriétés mécaniques comme la perte de résistance et la perte de rigidité. En plus, les sollicitations mécaniques créent des microfissures qui peuvent être des facteurs accélérant le processus de dégradation chimique.

La durabilité peut être, donc, définie comme la résistance du béton aux agressions chimiques ou physiques, en maintenant son comportement et ses performances dans de bonnes conditions de service prévus pour l'ouvrage.

Généralement, les agressions chimiques sur le béton affectent d'abord la pâte de ciment. Le béton, le mortier ainsi que la pâte de ciment hydraté, peuvent être considérés comme des matériaux multiphasiques composés d'une phase solide (squelette poreux comme les granulats et hydrates) et d'une phase liquide (solution interstitielle) et d'une phase gazeuse (air sec, vapeur d'eau, CO₂ ...) se trouvant à l'intérieure du matériau solide [53].

Ainsi, la perméabilité, la diffusion et l'absorption sont les trois principaux processus qui peuvent amener des substances agressives à pénétrer dans le béton et affecter ses qualités méca-

niques et protectrices (à l'égard de la corrosion des armatures principalement). La perméabilité 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. D'autre part, les trois fluides naturels qui peuvent se déplacer selon les processus mentionnés ci-dessus et remettre en cause la durabilité du béton sont : l'oxygène, l'eau (contenant ou non des ions agressifs) et le dioxyde de carbone. La durabilité du béton dépend donc de sa capacité à résister à la pénétration de ces fluides à l'intérieur du matériau suivant les trois mécanismes d'écoulement possibles.

Bien que dans la réalité les différents mécanismes de transfert agissent simultanément, ceux-ci sont examinés (en laboratoire) séparément afin d'apprécier les propriétés fondamentales en jeu. Différents essais ont donc été réalisés pour quantifier les propriétés révélatrices de ces processus de dégradation physico-chimique du matériau BAP.

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).

Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons auto-plaçants, la perméabilité (aux gaz), la migration des ions chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation et leur résistance au gel – dégel, la pénétration d'agents agressifs qui peut conduire à l'amorçage (et au développement) du processus de corrosion des armatures, Les réactions chimiques internes, mettant en jeu des espèces issues du milieu environnant ou déjà présentes dans le matériau, telles que l'alcali-réaction ou les attaques sulfatiques, sources de gonflement et de fissuration du béton.

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 aureoles 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.2. LES ATTAQUES CHIMIQUES DES BÉTONS

Les agressions chimiques que peuvent rencontrer les matériaux à matrice cimentaires sont très variées. De part sa porosité et la composition chimique de la solution interstitielle, des échanges de matière peuvent se produire et être à l'origine d'une évolution de la composition solide de la pâte de ciment. Ces phénomènes de transport et de réaction s'effectuent à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment [53]. Parmi une multitude de causes de dégradation des matériaux cimentaires, figurent les attaques par les sulfates et la carbonatation.

II.2.1. Attaque par les sulfates

L'attaque du béton par les sulfates résulte d'une réaction chimique qui se produit en présence d'eau entre l'ion sulfate et l'aluminate de calcium hydraté, et/ou les éléments constitutifs de l'hydrate de calcium de la pâte de ciment durcie. Les produits qui résultent de ces réactions sont l'hydrate de sulfoaluminate de calcium communément appelé ettringite et l'hydrate de calcium mieux connu sous le nom de gypse. Les volumes de ces solides sont beaucoup plus grands que ceux des corps qui leur ont donné naissance ; il en résulte des contraintes qui peuvent détériorer la pâte et finalement désintégrer le béton.

II.2.1.a. Sources des sulfates

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique et industrielle. Dans certaines régions où les sols contiennent du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou de l'anhydrite (CaSO_4), on peut rencontrer des concentrations élevées (> 5%) [54].

- Afrique du Nord : Na_2SO_4 (58 g/l),
- Prairies Canadiennes: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (194 g/l), K_2SO_4 (111 g/l), $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (440 (g/l)
- France (Paris): CaSO_4 (2,1 g/l).

Les eaux souterraines en contact avec ces sulfates peuvent se charger en ions SO_4^{-2} . Les sols alluviaux ou argileux peuvent aussi contenir des pyrites qui s'oxydent en sulfates au contact de l'air et d'humidité avec formation d'acide sulfurique. Les sulfates peuvent aussi provenir de la décomposition biologique aérobie de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes). Les sources de sulfates peuvent aussi être internes [54]:

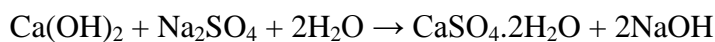
- contamination des granulats par du plâtre,
- granulats gypseux,
- sulfures dans certains granulats.

II.2.1.b Mécanisme de l'attaque par les sulfates

Des roches et des minéraux naturels provenant des sulfates de calcium (gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et anhydrite CaSO_4), et des sulfates de magnésium (epsomite $\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) forment la source externe de sulfates la plus présente dans la nature. Cependant, ce n'est que lorsque ces sulfates sont dissous dans l'eau (souterraine ou autre) qu'ils présentent un danger potentiel pour pénétrer dans la matrice du béton, réagir avec les hydrates et changer leur structure.

Dans le cas du sulfate de sodium, les réactions chimiques se présentent comme suit [13] :

➤ Formation du gypse secondaire

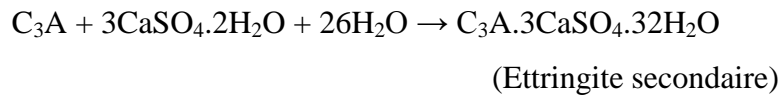


NaOH : Alcalinité élevée \rightarrow stabilisation des C-S-H.

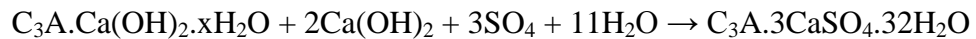
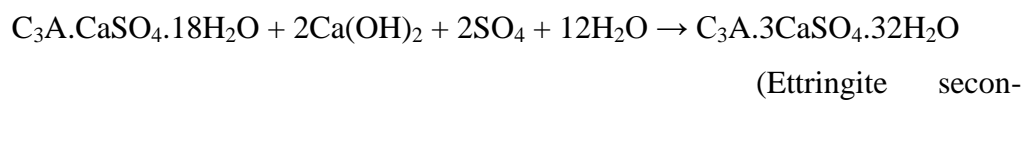
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté. Dans la majorité des cas, il n'ya pas ou peu d'expansion. Cependant, son dispositif agit pour diminuer la résistance et l'adhérence de la pâte de ciment due à la dissolution de la portlandite CH et le gel et la décalcification du C-S-H qui est responsable des propriétés liantes de la pâte de ciment.

➤ **Formation d'ettringite secondaire**

a) À partir du C3A anhydre résiduel:



b) À partir des aluminates hydratés:

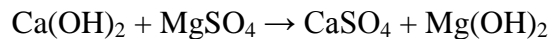


La précipitation de l'ettringite secondaire conduit à la formation de cristaux très fins (ettringite non fibreuse de nature colloïdale) dont le volume molaire est de 3 à 8 fois supérieure au volume du solide initial.

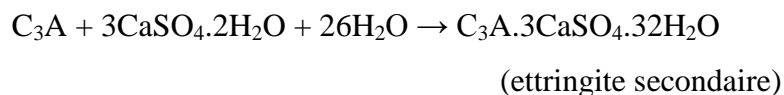
Les mécanismes de dégradation sont dépendant également de la nature du cation (Ca^{+2} , K^+ , Mg^{+2} ...etc.) qui est associée aux ions sulfates dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment. Le sulfate de magnésium est très agressif par rapport au sulfate de sodium.

Le sulfate de magnésium réagit par double action :

- En présence de magnésium la portlandite réagit pour former de la brucite, le gypse et l'ettringite :



Mg(OH)2 : Brucite (faible solubilité, alcalinité faible, pH faible)



- Substitution des ions Ca^{++} par les ions Mg^{++} dans les C-S-H :



(C,Mg)-S-H: gel faiblement cohésif.

Les eaux souterraines ou l'eau de mer sont souvent riches en sulfates de magnésium (MgSO_4). Dans ce cas, les deux ions, cations et anions, participent à la réaction. Les ions SO_4^{2-} réagissent avec les aluminates (ou la portlandite) pour former de l'ettringite (ou du gypse), tandis que les ions Mg^{+2} peuvent réagir avec les ions OH^- et former de la brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ou causer un remplacement partiel du calcium par du magnésium dans les C-S-H. Le silicate de magnésium hydraté (M-S-H) ainsi formé n'a pas de propriétés liantes, et par conséquent, la pâte hydratée devient molle et incohérente [55].

❖ Etudes relatives aux BAP

Dans une étude de la résistance du béton autoplaçant à l'attaque par des sulfates. À cet effet, nous pouvons constater l'augmentation du gain de masse avec la diminution de la classe de résistance et ainsi avec l'augmentation du rapport E/Léqui. En effet, quand le rapport E/C diminue, le volume et la connectivité du réseau poreux se réduisent, et rendent donc la pénétration des agents agressifs plus difficile [56] (figure I.22).

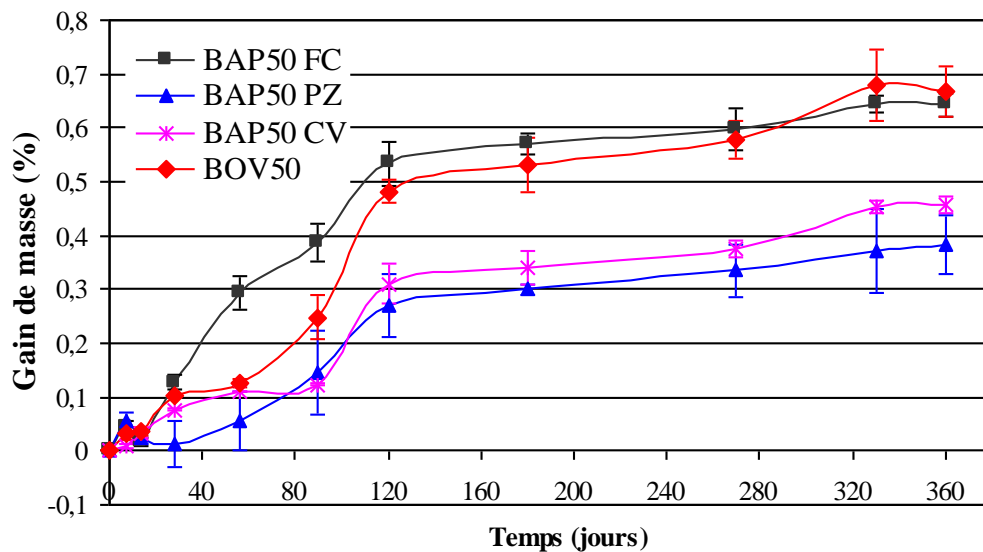


Figure I.22: variation de la masse des échantillons immergés dans la solution du sulfate de sodium (bétons de classe 50 MPa) [56].

Les résultats des BAP et BOV montrent que la comparaison entre ces deux types de béton est en rapport direct avec l'addition minérale utilisée dans les BAP. Les BAP PZ et les BAP CV présentent un gain de masse moins important que celui des BOV de même classe de résistance. Le BAP70 FC et le BAP50 FC présentent un gain de masse presque similaire avec celui du BOV70 et du BOV50 en cas de prendre en compte la dispersion des mesures. L'évolution

de la masse du BAP30 FC est moins importante que celle du BOV30, mais elle est plus sensible à la dégradation par l'attaque du sulfate de sodium.

L'influence du mode de conservation sur la variation de la masse des bétons a été évaluée en mesurant la différence entre la variation de la masse des éprouvettes conservées dans la solution de sulfate de sodium et celles des éprouvettes conservés dans l'eau douce (figure I.23).

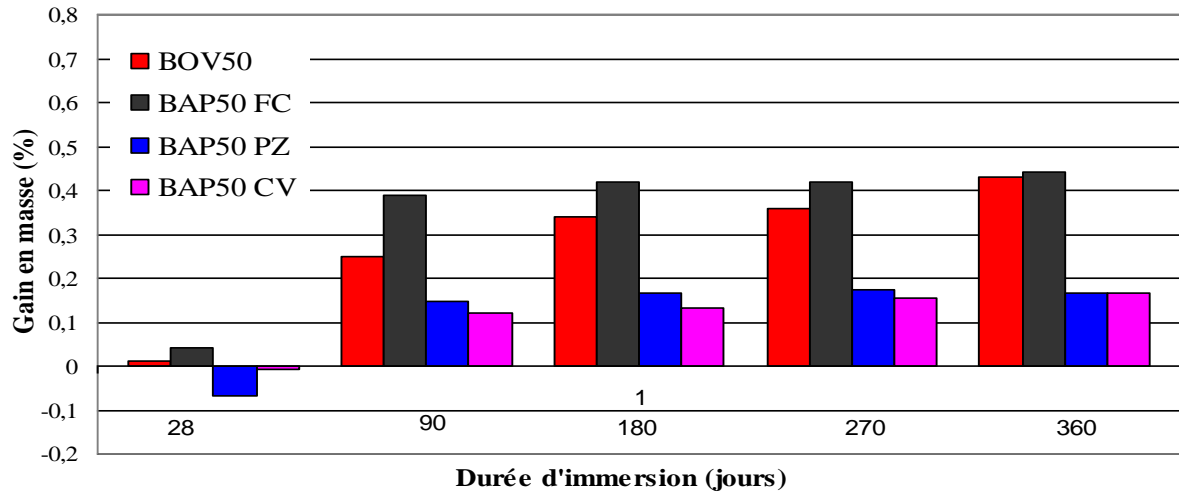


Figure I.23: Différences de variation de masse entre éprouvettes soumis à l'attaque du sulfate de sodium et éprouvettes témoins (classe 50 MPa) [56].

Il a remarqué par comparaison entre BAP CV et BAP PZ, des résultats presque similaires (< 0,03%) pour les deux classes de résistance 70 et 50MPa. Pour la classe 30 MPa, le BAP30 PZ présente un faible gain de masse, la différence semble augmentée avec le temps d'immersion (0,25 % après 360 jours d'immersion).

Le changement de la longueur des éprouvettes ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) des différents bétons conservés dans la solution de 5% de sulfate de sodium, s'effectue selon la norme ASTM C1012 (2004). La référence est la dernière mesure avant immersion.

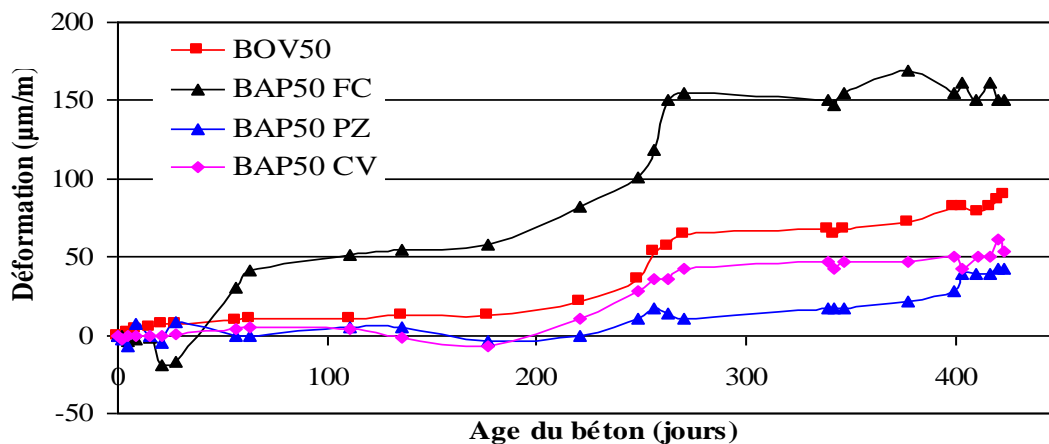


Figure I.24: Evolution des déformations, différence entre le milieu témoin et le milieu sulfatique (bétons de classe 50 MPa) [56].

Le gonflement du BAP50 PZ et du BAP50 CV est enregistré seulement après 220 jours d'immersion. Après 420 jours, la différence entre le milieu témoin et sulfatique est faible (53,72 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le BAP50 PZ et de 42,94 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le BAP50 CV). Le BAP50 FC présente un gonflement plus élevé par rapport aux autres bétons (161,66 $\mu\text{m}/\text{m}$ après 420 jours d'immersion). Pour le BOV50, le gonflement est observé dès la première semaine, mais la différence entre le milieu témoin et le milieu sulfatique reste faible durant les 420 jours d'immersion (89,7 $\mu\text{m}/\text{m}$).

La résistance à la compression des bétons conservés dans la solution sulfatique se développe positivement jusqu'à 28 jours d'âge d'immersion. À partir de cette échéance, la résistance du BOV tend à diminuer progressivement jusqu'à 360 jours pour atteindre une différence (12%) par rapport à la résistance initiale avant immersion dans la solution sulfatique. La chute de résistance est attribuée à la formation du gypse et de l'ettringite expansive causant des microfissures dans le béton.

Le BAP-FC présente une résistance maximale à 90 jours d'âge d'immersion pour diminuer légèrement à 360 jours, mais en tenant compte de la dispersion des mesures, nous pouvons dire que la résistance est stable pour ce type de béton.

Pour le BAP-PZ et le BAP-CV, la résistance continue d'augmenter jusqu'à 360 jours d'immersion. La conservation dans la solution sulfatique ne semble pas beaucoup influencer la résistance de ces deux types de BAP.

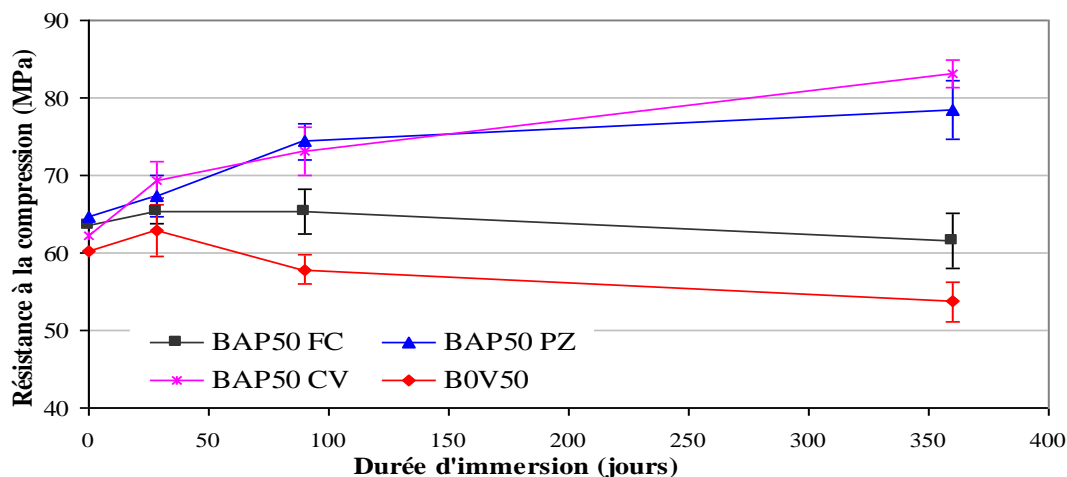


Figure I.25: Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% Na_2SO_4 , classe 50 MPa [56].

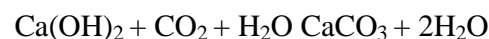
Les résultats de la résistance à la compression de toutes les classes de résistance montrent une influence positive de la pouzzolane naturelle et de la cendre volante sur la résistance à l'attaque des sulfates de sodium. Cela est dû principalement à la faible diffusivité de ces bétons et à la réduction de la teneur en portlandite (CH) par réaction pouzzolanique, ce qui retarde et empêche la formation du gypse et de l'ettringite secondaires.

❖ Conclusion

Les résultats montrent que pour toutes les classes de résistance, la pouzzolane naturelle influence considérablement et positivement sur la résistance des bétons autoplaçants (BAP) dans les milieux contenant des sulfates de sodium. Les résultats montrent également d'une façon générale des comportements très proches entre la pouzzolane naturelle et la cendre volante. Les formulations du BAP PZ présentent un gain en masse, une expansion et une variation de résistance à la compression très comparables avec ceux du BAP CV.

II.2.2. Carbonatation

Bien que généralement supposé inerte vis-à-vis du béton, l'air ambiant contient du dioxyde de carbone qui peut réagir avec le ciment hydraté. Lorsque le dioxyde de carbone diffuse à l'intérieur du béton, en présence d'eau, il réagit en premier lieu avec la portlandite (ou chaux hydratée, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) pour former du carbonate de calcium (ou calcite, CaCO_3) selon la réaction suivante :



L'un des effets de cette réaction est le retrait de carbonatation. En ce qui concerne la durabilité, l'importance de la carbonatation réside dans le fait que, par suite de ces transformations, le pH de la solution interstitielle diminue et devient inférieur à dix. Si ce front de carbonatation progresse jusqu'à la surface des armatures, la couche protectrice de passivation des aciers (nécessitant un pH élevé) est dissoute et la corrosion des armatures peut se produire, à condition que l'oxygène et l'humidité nécessaire soient présents. Le dioxyde de carbone (l'acide carbonique, en fait) réagit aussi avec les autres hydrates tels que les aluminates et les silicates de calcium hydratés (C-S-H). Autrement dit, les principaux constituants du ciment sont sujets à la carbonatation (figure I.26).

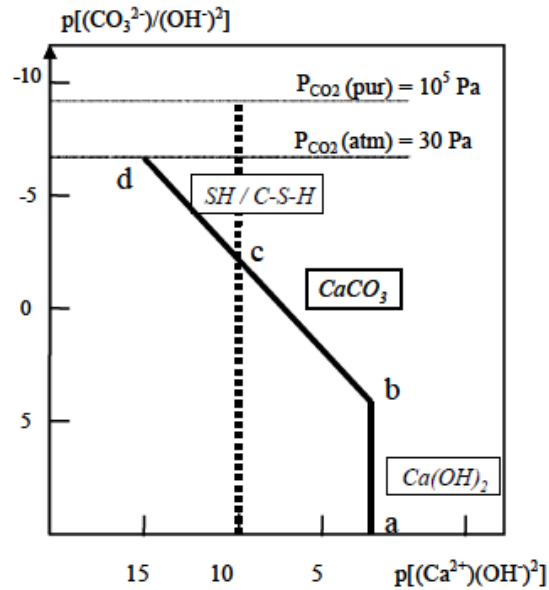


Figure I.26: Diagramme des équilibres thermodynamiques à 20°C des phases hydratées du ciment avec le CO₂

Le point (a) représente la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans un milieu exempt de CO₂. Lorsque le CO₂ pénètre dans le béton, il se dissout dans la phase liquide interstitielle et réagit avec la portlandite : on se déplace sur la ligne (ab) jusqu'à atteindre le point (b) qui correspond à la précipitation de carbonate de calcium CaCO_3 . On reste sur ce point tant que toute la portlandite n'a pas réagi. Ensuite, le gaz carbonique dissout peut réagir avec les gels de C-S-H suivant la ligne (bc) avec précipitation au point (c) de silice hydratée $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Quand tout le C-S-H est consommé, on se déplace alors sur la ligne (cd) jusqu'à atteindre la concentration en gaz carbonique correspondant à la pression partielle à l'équilibre.

Les produits de la carbonatation interagissent sur la structure poreuse, la perméabilité du béton et la réactivité chimique de la pâte de ciment. Parmi ces effets positifs ou négatifs, il y a premièrement la réduction de porosité du béton carbonaté puisque le CaCO_3 formé (volume molaire $37 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$) occupe un volume plus important que le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qu'il remplace ($33 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$).

De plus, l'eau libérée par la réaction peut participer à l'hydratation du ciment anhydre. Ces deux phénomènes ont pour conséquence une diminution de la perméabilité et une augmentation de la résistance de surface. En revanche, la résistance aux ions agressifs est affectée par la carbonatation de façon négative. Les ions chlore chimiquement combinés et physiquement

adsorbés sont libérés pendant la progression de la réaction de carbonatation et leur concentration dans la solution interstitielle se retrouve augmentée. Cette interaction entre carbonatation et dégradation du béton par les chlorures est la cause possible de nombreux problèmes de dégradation par corrosion d'ouvrages en béton armé.

La carbonatation se développe depuis la face extérieure vers le cœur de l'élément en béton. Le dioxyde de carbone se diffuse donc non seulement à travers le réseau poreux mais également à travers la zone de béton déjà carbonatée. La vitesse de carbonatation est contrôlée par la pénétration par diffusion du dioxyde de carbone dans le réseau poreux. Cette vitesse de diffusion dépend du taux d'humidité du matériau : trop faible, le CO_2 reste à l'état gazeux et ne réagit pas avec la pâte de ciment hydraté; trop fort, les pores saturés en eau empêchent la progression du dioxyde de carbone (diffusion quatre fois plus lente que dans l'air [44]).

Il est communément admis que le front de carbonatation progresse une fois que tous les matériaux susceptibles d'être carbonatés ont été transformés. Par conséquent, la vitesse de carbonatation est régie par les mécanismes de diffusion et le coefficient de diffusion du dioxyde de carbone dans le béton carbonaté est la caractéristique essentielle de ce transfert. En considérant que ce coefficient dans la couche carbonatée est constant, la profondeur de carbonatation peut-être exprimée à partir de la première loi de Fick relative à la diffusion, appliquée à un milieu poreux (flux d'une espèce ionique fonction du produit du coefficient de diffusion de cette espèce et de la dérivée partielle de sa concentration selon la position). Cette relation est la suivante:

$$X = K.t^{1/2}$$

Avec X la profondeur de carbonatation (mm) au temps t , t le temps d'essai (jour, par exemple) et K une constante dépendant de la résistance à la diffusion du béton ($\text{mm}/\text{jour}^{1/2}$).

Parmi les facteurs influençant la carbonatation et sa vitesse de propagation, certains sont d'ordre intrinsèque au béton et d'autres relatifs aux conditions environnementales. Citons par ordre d'importance, le rapport E/C (lié à la microstructure et au réseau poreux), la teneur en CO_2 , le taux d'humidité et la température.

❖ Études relatives aux BAP

Dans l'atmosphère, la carbonatation est très lente et pour mieux évaluer ses conséquences à long terme, des essais accélérés sont réalisés en laboratoire [56].

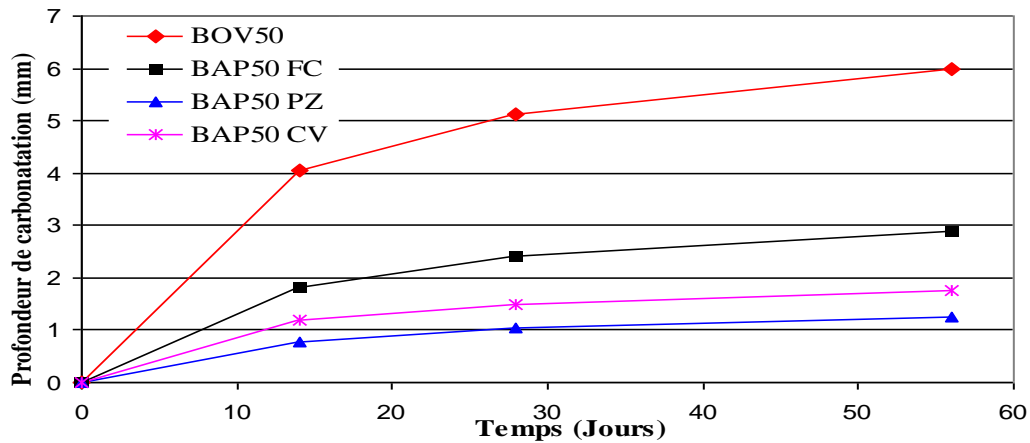


Figure I.27: Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée des bétons de classe 50 MPa [56].

Les valeurs des profondeurs carbonatées pour les BAP de classe 50 MPa sont comprises entre 0 et 3 mm. En revanche, celle du béton ordinaire vibré atteint une valeur de 6 mm à 56 jours. On remarque que la cinétique de carbonatation du BAP50 PZ est plus faible que celle du BAP50 CV qui à son tour est plus faible que celle du BAP50 FC [56].

D'autres résultats conduisent à des conclusions similaires. L'augmentation de la quantité de ciment, qui implique un rapport E/C plus faible et une résistance mécanique plus élevée, conduit à une profondeur de carbonatation plus faible.

Les premiers résultats faisant état d'une comparaison entre BAP et bétons vibrés indiquent qu'il semble ne pas y avoir de différence notable entre leurs cinétiques de carbonatation. Et que l'addition de filler n'a pas une influence claire sur la profondeur de carbonatation.

Cependant, les résultats d'études des bétons de la classe de résistance de 30 MPa, montrent plus nettement l'effet positif de la pouzzolane naturelle et de la cendre volante sur la résistivité des BAP vis-à-vis de la carbonatation accélérée. La comparaison entre les formulations du BAP et du BOV, révèle que le BOV est moins résistant à l'attaque par le dioxyde de carbone que le BAP. A l'exception de BAP FC, la différence entre la profondeur de carbonatation entre le BOV et le BAP augmente d'une classe de résistance supérieure à une autre classe inférieure.

II.2.3. Autres phénomènes affectant la durabilité

Le béton est exposé à d'autres risques autres que ceux cités précédemment, qui sont aussi nocifs voir plus, parmi ces attaques il y'a :

a) Attaque des acides

Les eaux en contact avec le béton ont en commun d'être faiblement minéralisées, en particulier en calcium, et neutres ($\text{pH} = 7$) voire acides ($\text{pH} < 7$).

Le mécanisme de dégradation induit, provient de ces gradients de concentration entre les eaux agressives et la solution interstitielle du béton, d'un pH supérieur à 12 donc basique, et riche en calcium. Les principales espèces lixiviées sont de ce fait les ions calcium Ca^{2+} et hydroxyde OH^- [56].

La solution interstitielle n'étant plus saturée en ions calcium et en hydroxyde, les composés solides contenant ces espèces se dissolvent. La teneur en calcium des produits solides décroît avec la diminution de la concentration en calcium dans la solution porale. La lixiviation commence par la dissolution de la portlandite, puis des monosulfoaluminates, l'ettringite et les C-S-H se décalcifient [56].

Les milieux acides les plus fréquents sont: les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages (où le pH peut s'abaisser jusqu'à 4); Les milieux industriels (dans les industries chimiques ainsi que les industries agroalimentaires); Les réseaux d'égouts (l'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation des produits soufrés qui, combiné à l'humidité atmosphérique se condensent sous forme d'acide sulfurique qui va attaquer le béton); Les pluies acides (qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4.0 et 4.5, peuvent provoquer de la dégradation de la surface exposée du béton).

Un acide est d'autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles.

L'acide sulfurique est relativement inoffensif, car les sulfates de calcium sont difficilement solubles dans l'eau. Mais les ions de sulfate jouent en l'occurrence un rôle nuisible pour le béton (gonflement dû aux sulfates). L'acide sulfurique donc réagit avec la chaux libre dans le béton et forme du gypse. Cette réaction est associée à une augmentation du volume du béton.

Une action bien plus destructive est la réaction entre l'aluminate de calcium et les cristaux formés de gypse. Ces deux produits forment l'ettringite moins soluble de produit de réaction. L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car le sel correspondant (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau.

Les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium. Ils attaquent également les autres composants de la pâte de ciment durcie, en formant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) [56].

b) Le cycle gel-dégel

Les cycles de gel-dégel engendrent des dégradations progressives dans le béton. Le gel provoque la migration d'eau contenue dans les pores vers des zones où elle peut geler et créer des fissures sous l'effet de la formation de glace. Lors du dégel, ces fissures ne se referment pas et se remplissent d'eau qui est disponible pour un nouveau cycle de gel. La quantité d'air entraîné et la répartition des bulles d'air sont donc couramment admises comme facteurs primordiaux de la résistance au gel-dégel des bétons.

c) L'alcali réaction

La réaction alcali-silice est une pathologie des bétons qui se caractérise par une réaction chimique entre la silice amorphe ou mal cristallisée contenue dans les granulats réactifs et les alcalins de la solution interstitielle. Les conséquences macroscopiques de la réaction sont le gonflement des ouvrages atteints qui entraînent de la fissuration et la chute des caractéristiques mécaniques du béton.

d) La corrosion

La corrosion qui est définie comme étant l'interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs. Ce phénomène, d'un caractère essentiellement chimique, a une très grande importance économique puisque actuellement, les pertes dues à la corrosion et les dépenses occasionnées par celle-ci dépassent largement des milliards de dollars par an. Au niveau mondial, on estime que la corrosion détruit un quart de la production annuelle d'acier, soit 5 tonnes par seconde [56].

e) L'attaque des ions chlores

Les ions chlores peuvent provenir de diverses sources extérieures (sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles) et pénétrer dans le béton par diffusion (et/ou absorption). Lorsque ceux-ci se retrouvent en quantité suffisante (concentration minimale) dans l'eau interstitielle du béton ils engendrent une diminution du pH. Au voisinage des armatures en acier, cette diminution de pH détruit progressivement la couche protectrice (basique) des armatures. Il y a dépassivation de l'acier et le phénomène de corrosion peut alors commencer. Dans ce cas de figure, la durabilité du béton armé dépend fortement de la résistance du béton à la pénétration de ces agents agressifs (même s'ils ne dégradent pratiquement pas le béton lui-même). Les différentes comparaisons publiées sur la diffusion des ions chlores entre les BAP et les bétons ne permettent pas d'en déduire une tendance générale.

II.3. CONCLUSION

A travers les études menées sur la durabilité de différents bétons, nous avons constaté qu'il existe une relation entre le type d'addition et/ou le substitue (dans le cas des ciments composés) utilisée dans la pâte de ciment et les propriétés de transfert (perméabilité, diffusion, absorption) et la résistance chimique (carbonatation, attaque sulfate et attaque acide) de ces matériaux cimentaires. Cependant, les additions minérales utilisées dans ses travaux ne permettent pas de tirer des conclusions pertinentes sur la durabilité des BAP. En effet, ces derniers qui possèdent un volume très élevé de pâte et d'addition minérale semblent plus influencés par le type et la quantité des ajouts ou des substitues de ciment.

Ce qui signifie clairement qu'un besoin en recherche est nécessaire dans l'étude de l'effet de la nature et des proportions de nouvelles additions minérales et substitues de ciment sur la durabilité des BAP.

Chapitre III :
La valorisation dans les BAP

Chapitre III : La Valorisation dans les Bétons Autoplaçants

III.1. INTRODUCTION

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines supérieure à celle des bétons conventionnels (environ 500 kg/m³). Ces fines proviennent du ciment, des additions, des granulats et des adjuvants.

La quantité de pâte joue un rôle important dans la fluidité car l'ajout de fines réduit les interactions entre les plus gros grains. Il est donc nécessaire dans le cas des BAP de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Différentes additions sont citées dans la littérature, les plus courantes sont :

- cendres volantes, • laitiers de hauts fourneaux, • fumées de silice et • fines calcaires.

Elles sont utilisées en général pour diminuer le coût du béton en remplacement d'une partie du ciment, ou pour améliorer la continuité du squelette granulaire, réduire les problèmes de ressuage et/ou ségrégation et ainsi éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes.

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (DTU 21, normes XP P 18-305 ou EN 206, etc.) et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions et leur proportion respective.

III.2. LES ADDITIONS MINÉRALES DANS LES BAP

Les appellations des additions minérales se réfèrent à une origine minéralogique; les additions portant la même appellation peuvent donc être très diverses. La granulométrie et la forme des grains dépendent par exemple du procédé de fabrication. Cela explique sûrement pourquoi certains résultats de la littérature se contredisent.

Ces matériaux peuvent avoir une influence chimique et/ou un rôle physique selon leurs natures.

∅ Fines calcaires

Elles sont soumises à la Norme NFP 18 508 qui les définit comme des « produits secs finement divisés », obtenus par broyage, et/ou sélection, provenant de gisements de roches calcaires [57].

Les fillers calcaires cumulent trois propriétés intéressantes : une certaine activité hydraulique, des éléments de faible dimension qui permettent un remplissage granulaire efficient et un faible coût [58].

L'industrie des matériaux de constructions issus des carrières est toujours accompagnée par des produits secondaires (fillers calcaires) ou des déchets qui ont une incidence directe sur l'environnement. Le but est donc de valoriser ces déchets afin de les utiliser dans le domaine du génie civil [58].

En Algérie plus de mille unités produisent annuellement 68 millions de tonnes de granulats, de nature calcaire. Malheureusement, plus de 20% des sables produits sont impropres à l'utilisation comme sable de construction du fait d'une teneur en fines ($d \leq 80\mu\text{m}$) supérieure à 12 % (limite normative actuelle). De même, les fillers calcaires, qui résultent aussi du processus de concassage et de broyage des roches calcaires, sont considérés comme des résidus inutilisables et donc inexploitable [58].

Les fillers calcaires peuvent avoir plusieurs rôles :

1. Un rôle de remplissage en corrigeant la granulométrie des éléments fins du ciment ;
2. Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle ;
3. Un rôle chimique et physique par augmentation des résistances et amélioration de la durabilité [58].
4. Un rôle de densification sur le béton

D'après l'étude faite par les chercheurs, il s'est avéré que pour des teneurs en fillers de 10%, les performances mécaniques en compression des pâtes de ciment se trouvent augmentées, jusqu'à 10% pour les fillers les plus fins [58].

L'incorporation des fillers ayant des surfaces spécifiques élevées améliore sensiblement la résistance à la compression surtout pour des valeurs de substitution de l'ordre de 10%. Au-delà de cette valeur, on observe des chutes de résistances allant jusqu'à 45% à 40% de substitution massique du ciment des fines calcaires [58].

La finesse des fines calcaires joue un rôle prédominant dans l'amélioration des performances mécaniques des pâtes de ciment. La réactivité chimique de ces fines et la formation de nouveaux composés tels que les carboaluminates semblent être les principales causes [58].

Zhu et Gibbs [31], ont étudié l'influence de différents types de filler calcaire sur les BAP. Dans le cas des pâtes de ciment, le type de filler utilisée ne semble pas avoir d'influence sur l'étalement. Par contre, si on s'intéresse au béton, ils montrent que le type de filler a une forte incidence sur la quantité de superplastifiant pour un étalement donnée. En effet, le filler à base de craie demande plus d'adjuvantation que le filler calcaire. La différence intervient dans la présence d'impuretés, la compacité et le processus d'absorption.

Malgré cela, quel que soit le type de filler utilisé, leurs résultats montrent que plus il y a de filler en substitution du ciment, moins il faut de superplastifiants pour atteindre un étalement donné.

⌘ **Les fines des sables**

La norme P 18-301 fournit des spécifications concernant la propreté des sables à bétons. Dans le cas des sables entièrement broyés ou concassés, les teneurs en fines tolérées peuvent être assez importantes et il est nécessaire d'en tenir compte dans la composition lors du calcul de l'optimum en fines. Pour diverses raisons liées à la fabrication et à la ségrégation des tas, on doit craindre une certaine variabilité de cet apport de fines. Le béton dont le dosage global moyen en fines (ciment, additions, fillers et fines du sable) est optimum, est aussi le béton le moins sensible à ces fluctuations [57].

⌘ **Fumées de silice**

C'est une poudre amorphe de silice extrêmement fine, récupérée dans les cheminées lors de condensation des gaz de réaction résultant de la fabrication du silicium ou d'alliages [57].

L'influence des fumées de silice n'est pas très claire. Pour certains auteurs Ferraris, et Shi, les fumées de silice augmentent le seuil de cisaillement et la viscosité tout en améliorant la compacité des mélanges. Par contre, pour Carlsward, les fumées de silice ne modifient pas la viscosité. Par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence, Ferraris et al, montrent que l'utilisation de fumées de silice augmente la demande en eau et en superplastifiant que ce soit pour des pâtes de ciment ou bien pour des bétons [56].

Mais plusieurs études, montrent que la présence de fumée de silice accélère la réaction d'hydratation du ciment portland. Cet effet accélérateur des fumées de silice est important lorsque celles-ci sont utilisées avec un fluidifiant [57].

Cet effet accélérateur des fumées de silice sur l'hydratation du ciment, combiné à l'effet de remplissage dû à leur extrême finesse peut conduire à de meilleures résistances du béton à court terme [57].

∅ **Scories des hauts fourneaux (Laitiers)**

Elles proviennent du broyage du laitier vitrifié, lui-même obtenu par la trempe du laitier de haut fourneau en fusion. Le laitier contient de la chaux (45 à 50 %), de la silice (25 à 30 %), de l'alumine (15 à 20 %) et 10% environ de magnésie d'oxydes divers et de manganèse [57].

La norme NF F506 fournit des spécifications concernant son utilisation qui permet de diminuer la quantité de chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment, d'augmenter les hydrates dans la pâte, donc de diminuer la perméabilité du béton durci et améliorer sa durabilité aux sulfates et à l'eau de mer.

Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil et la viscosité des pâtes de ciment. D'autres études montrent par exemple que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le superplastifiant. Il est donc possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou une même valeur de seuil [56].

∅ **Cendres volantes**

Poudre fine constituée principalement de particules vitreuses de forme sphérique, dérivées de la combustion du charbon pulvérisé, ayant des propriétés pouzzolaniques et composées essentiellement de SiO_2 et Al_2O_3 . L'expression cendre volante désigne les cendres récupérées dans la cheminée par opposition aux cendres de foyer. Leur composition chimique les classe dans la catégorie dite des cendres silicoalumineuses. Les cendres calciques ou sulfocalciques ou silicocalciques sont exclues de la norme NF EN 450, car la présence de chaux et/ou de sulfates dans ces cendres peut poser des problèmes sérieux de durabilité [59].

L'utilisation de cendres volantes en général améliore la maniabilité. En termes de rhéologie, les cendres volantes réduisent le seuil de cisaillement, mais la viscosité plastique peut être augmentée ou diminuée. Par exemple, Sonebi a constaté que l'utilisation de cendres volantes réduit ces deux paramètres dans le cas des BAP. Cependant, Park et al ont constaté que la cendre volante a une faible incidence sur le seuil de cisaillement et sur la viscosité pâtes de ciment. Les cendres volantes peuvent aussi réduire la ségrégation et améliorer la stabilité [56]. Certains auteurs remarquent cependant que leur utilisation peut améliorer la fluidité, car leur forme sphérique permet de réduire les frottements entre les grains de ciment. Ferraris et al, montrent par ailleurs que le diamètre moyen des cendres volantes a une légère influence sur la valeur du seuil d'écoulement, les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines (diamètre moyen 3,1 μm). Associées à un superplastifiant, les cendres volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire à l'obtention d'une certaine fluidité (seuil de l'ordre de 20 Pa), mais le rapport E/C doit être suffisamment important (équivalent au rapport utilisé pour l'échantillon témoin), sinon la demande en adjuvant augmente fortement [56].

III.3. LES POUZZOLANES

Les pouzzolanes sont des matériaux naturels ou artificiels capables de réagir en présence d'eau, avec de l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des nouveaux composés stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [60]:

- 1) **Pouzzolane naturelle:** des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer et ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques.

- 2) **Pouzzolane artificielle:** des argiles et des schistes essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

Les pouzzolanes doivent leur nom aux cendres volcaniques de la région de Pouzzoles, en Italie, dont l'utilisation et les propriétés liantes étaient connues à partir de l'époque romaine [60]. Leur composition chimique est proche de celle des cendres volantes, mais elles sont produites à haute température par les éruptions volcaniques.

Les matériaux pouzzolaniques naturels que l'on rencontre le plus communément sont les cendres volcaniques, la pouzzolane naturelle, la pierre ponce, les argiles schisteuses, les opalines, les terres à diatomées calcinées et l'argile cuite.

En raison de leurs propriétés physiques, certaines pouzzolanes naturelles peuvent poser des problèmes. Par exemple, les terres à diatomées, du fait de leur nature anguleuse et poreuse, nécessitent un dosage en eau élevé. Certaines pouzzolanes naturelles voient leur activité améliorée par calcination entre 550 et 1100 C° selon le matériau concerné [7].

La sélection des pouzzolanes se fait sur la base du contenu en phase vitreuse, par la différence entre la teneur en silice et celle en chaux, respectivement, qu'on peut déterminer par les méthodes chimiques habituelles, une valeur limite se rapprochant de 34 % révélerait l'absence de phase vitreuse [56].

III.3.1 Caractéristiques des pouzzolanes

a. Compositions chimiques

Le domaine élargi des compositions chimiques des pouzzolanes naturelles est donné par le tableau I.1 ci-dessous:

Eléments	Pourcentages	
	D'après VENUAT	D'après SERSALE
SiO ₂	42 - 73	45 - 60
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	14 - 34	15 - 30
CaO + MgO + alcalins	03 - 21	≈15
Perte au feu	/	≈10

Tableau I.11: Domaine élargi des compositions des pouzzolanes naturelles [61].

Une vraie pouzzolane est constituée essentiellement d'une petite quantité de minéraux cristallins : (feldspath, leucite, augite, ... etc.), plongée dans une abondante masse amorphe, dans la plus part des cas vitreux, ou tout au plus submicrocristalline, plus au moins altérée par les agents atmosphériques, poreuse au point qu'elle simule un gel et avec une ample surface interne. A coté de la silice solubilisable, elle présente des quantités significatives d'alumine solubilisable [61].

b. Composition minéralogique

Les roches volcaniques peuvent être constituées minéralogiquement de composés suivants :

- Les composés sialiques (où la silice et l'alumine dominent): dans lesquels on peut distinguer les feldspaths, (des plagioclases) et le quartz.
- Les composés ferriques (silicates contenant du fer ou (et) du magnésium) les plus répandus sont : les pyroxènes, les olivines, les oxydes de fer et les minéraux hydroxylés.

III.3.2. L'activité pouzzolanique

L'activité pouzzolanique est la possibilité de lier la chaux en présence d'eau. Les causes de cette activité font le sujet de beaucoup de discussions. Nous nous intéressons à des pouzzolanes d'origine volcanique. L'activité pouzzolanique de ces matériaux naturels peut être influencée en changeant l'état physique par broyage, en ajoutant des additifs, en chauffant la pouzzolane et en augmentant la température.

Le mécanisme de la réaction pouzzolanique peut se comprendre aisément grâce au diagramme triangulaire $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ de Keil (voir Figure I.28) à partir des positions relatives des différents composés impliqués dans le phénomène de la réaction.

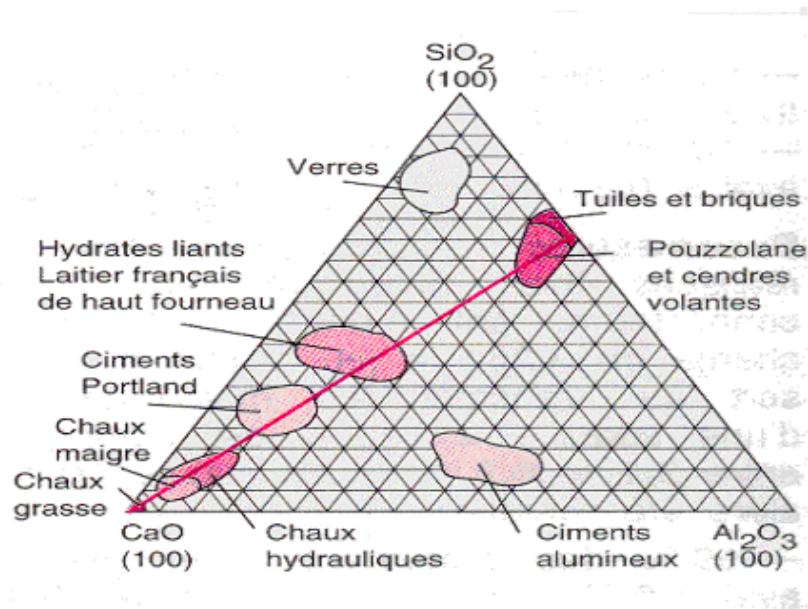


Figure I.28: Diagramme de Keil (Zone des pouzzolanes dans le système $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) [62]

L'eau n'étant pas représentée sur ce diagramme, la chaux grasse, vive ou éteinte, occupe le pôle CaO. Les briques, les pouzzolanes et les cendres volantes sont approximativement sur la ligne $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ au premier tiers en partant de la SiO_2 .

La droite qui relie le centre de l'aire des pouzzolanes et le pôle CaO traverse d'abord la zone commune aux hydrates à caractère liant et aux laitiers de hauts fourneaux, ensuite celle des clinkers de ciment Portland et enfin celle des chaux hydrauliques, avant de rejoindre le pôle même, représentatif de la chaux grasse.

Selon différentes études, les matériaux pouzzolaniques doivent satisfaire trois conditions :

1. Être acide : contenir une forte proportion de silice et d'alumine.
2. Contenir une proportion importante de phase vitreuse.
3. Présenter une grande surface spécifique.

Deux catégories d'essais sont envisagées soit pour caractériser l'intensité ou simplement l'existence de la réaction pouzzolanique, soit pour mettre en évidence la formation de produits d'hydratation spécifiques (plus précisément de prouver que ces produits ont une influence sur les caractéristiques mécaniques du système). Le premier type d'essais se rattache à des déterminations chimiques, tandis que le second s'appuie plutôt sur des mesures physiques à savoir sur les résistances mécaniques [62].

III.3.3. Les produits d'hydratation du Clinker

Il est difficile de distinguer les produits d'hydratation du clinker de ceux formés par la réaction pouzzolanique. En effet, d'après R. DRON qui a étudié les domaines d'hydratation des liants du système $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ le point représentatif des pouzzolanes se situe à l'intérieur du triangle formé par le silicate de calcium hydraté C-S-H, l'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ et l'acide silicique $\text{Si}(\text{OH})_4$. L'addition de chaux a pour effet de modifier la composition globale du système et amène le point représentatif dans le triangle $\text{Ca}(\text{OH})_2$, C-S-H, C_4AH_{13} . Or, le clinker se trouve également dans ce triangle et par conséquent donne les mêmes produits d'hydratation [62].

Cependant, devant les difficultés et les incertitudes des autres méthodes, il apparaît que l'étude de l'évolution du durcissement est sans doute plus logique puisqu'elle mesure directement le

résultat recherché et que l'on devrait pouvoir aussi connaître l'apport des matériaux pouzzolaniques aux résistances mécaniques.

III.3.4. Les produits de la réaction pouzzolanique

Les produits issus des réactions entre les pouzzolanes et la chaux sont en général des minéraux mal cristallisés. Les espèces et les compositions des hydrates produits dépendent en général du caractère, c'est-à-dire de la composition chimique des produits pouzzolaniques, de la structure cristalline des constituants de la pouzzolane ainsi que des conditions de l'hydratation (température, teneur en eau, serrage, ...). Ces hydrates sont pratiquement les mêmes que ceux observés lors de l'hydratation d'un ciment portland ou d'un ciment de laitier par exemple.

Les trois principaux composés hydratés issus de la réaction pouzzolanique sont : C-S-H, C_4AH_{13} et C_2ASH_8 , et ils ne peuvent coexister que lorsque la solution est sous-saturée en chaux.

III.4. LA POUZZOLANE NATURELLE DE BENI-SAF

Les formations volcaniques du littoral oranais se développent sur une étendue de 160 km de long, allant de la frontière Algéro-Marocaine au cap sigale à 35 km à l'Est de la ville d'Oran. La largeur de cette bande atteint 20 km.

Ce sont des roches saturées (andésites) ou nettement acides (dacites, rhyolites). Elles ont donné lieu non seulement à l'édification d'un grand volcan (Tifraouine) mais également à des pitons volcaniques de type péléen, à d'importants dépôts de cendres et fait plus remarquable, à des phénomènes secondaires très particuliers tels une intense salification de tout un secteur environnant. Ce massif vaut soit par les tufs andésitiques ou dacitiques, soit par des roches salicifiées qui peuvent être le constituant secondaire idéal pour réaliser des ciments sursilicés de qualité, hautement résistants aux agents agressifs [56].

Dans la région de Béni-Saf les formations géologiques d'origine volcanique sont nombreuses. Plusieurs carrières de pouzzolanes y sont exploitées au profit des cimenteries locales et approvisionnent d'autres cimenteries de régions plus éloignées.

Le laboratoire de la cimenterie de Béni-Saf, sous l'égide de la SNMC (Société Nationale de Matériaux de Construction, a effectué plusieurs séries d'essais dans le but de produire à une échelle industrielle un ciment de type CEM II en incorporant au ciment portland (CEM I) de la pouzzolane. Les conclusions suivantes ont été émises [63]:

- ✓ Substituer un pourcentage de produit de moindre coût (pouzzolane naturelle) au ciment (CEM I) plus coûteux, diminue son coût de revient.
- ✓ L'utilisation de la pouzzolane comme ajout dans les ciments, en plus de l'aspect économique, offre de meilleures performances techniques : le CEM II obtenu est de classe supérieure.
- ✓ Une amélioration des résistances mécaniques ainsi que la durabilité chimique des mortiers et bétons ont été constatées. Cela est attribué aux effets physiques et pouzzolaniques de l'ajout.
- ✓ La quantité d'ajout doit être définie par des essais préliminaires en fonction des caractéristiques de la pouzzolane substituée et des caractéristiques techniques recherchées.
- ✓ Les résistances mécaniques ainsi que la durabilité chimique des mortiers à base de pouzzolane ont nettement été améliorées avec l'augmentation de la finesse de la pouzzolane.

III.4.1. Etudes relatives à la Pouzzolane Naturelle de Beni-saf

D'après l'étude de Semcha [63], l'effet pouzzolanique pour les mélange 20% et 30% de pouzzolane est remarquable à partir de 45 jours. Cela est dû à la réaction pouzzolanique qui ne s'amorce qu'à partir du moment où la chaux est libérée par l'hydratation du ciment.

Quelques études Belas-Belaribi et al, 2003, Mebrouki et al, 2006, Eziane et al, 2007, Mouli et Khelafi, 2008, ont démontré que la roche de pouzzolane du Beni-Saf (Algérie) possède des propriétés pouzzolaniques. Ainsi, elle est employée et commercialisée principalement auprès des cimenteries qui l'utilisent comme ajout actif à des taux de 15 à 20 % dans la fabrication des ciments composés Kaid, 2010. Habituellement, seules les caractéristiques mécaniques (résistance à la compression et à la flexion) sont vérifiées. La connaissance des performances de cette pouzzolane en termes de durabilité demeure encore limitée [56].

Récemment des recherches ont été entreprises sur la durabilité des mortiers à base de cette pouzzolane conservés dans des milieux agressifs Ghrici [75]. Ils ont constaté un gain dans les résistances à la compression des mortiers conservés dans une solution de 5% en sulfates de sodium avec l'utilisation de 20% et 30% de pouzzolane à moyen terme (6 mois). L'étude de la perméabilité aux ions chlore des bétons à base de cette pouzzolane naturelle a été limité à la

mesure de la charge électrique traversant l'échantillon de béton Ghrici et al, 2006, 2007. Ce résultat a révélé une meilleure perméabilité du béton à base de 30% de pouzzolane par rapport à celui d'un béton témoin et un béton ternaire à base de 20% de pouzzolane naturelle et 10% de filler calcaire [56].

III.5. LES SÉDIMENTS DE DRAGAGE

III.5.1. Définition et origine

Les sédiments, plus communément appelés vases, sont définis comme « un ensemble constitué par la réunion de particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant, séparément, subi un certain transport ». La sédimentation désigne l'ensemble des processus par lesquels ces particules organiques ou minérales en suspension et en transit cessent de se déplacer [65].

On distingue 2 origines aux sédiments:

- ∅ **Origine endogène** : les particules proviennent de la production autochtone du milieu. Il s'agit de débris de macrophytes comme les plantes aquatiques, les cadavres de microphytes et d'animaux [66].
- ∅ **Origine exogène** : il s'agit des particules qui sont issues du ruissellement des eaux ou bien transportées par les vents. D'origines naturelles ou anthropiques, elles proviennent de l'érosion des sols, de la décomposition de matière végétale, de l'apport de matière en suspension, matières organique, le nutriments ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques [67].

III.5.2. Constitution des sédiments

Les vases sont constituées de 4 éléments principaux [68]

1. La matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates) ;
2. La fraction argileuse (kaolinite, illite ou montmorillonites) ;

3. La fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, acides fulviques et humiques);
4. Une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.

Les argiles sont des silicates d'aluminium hydratés qui présentent une structure cristalline en feuillets, d'où leur nom de phyllites. Ils appartiennent, comme les micas, au groupe des phyllosilicates. Chaque cristal ou phyllite, dont l'épaisseur se mesure en micromètres, est composé de quelques centaines de feuillets empilés, qui se mesurent en nanomètres. Chaque feuillet est composé de deux, trois ou quatre couches planes associées. De ses variations viennent les différentes espèces de minéraux argileux, parmi elles [69]:

∞ **Les illites**

Ce minéral est le plus répandu des minéraux argileux dans les sédiments et les sols. Il est construit sur le modèle du mica blanc, mais avec une structure plus désordonnée et moins de potassium dans les espaces interfoliaires. Il est très fréquent dans une foule de roches détritiques comme matrice ou comme ciment. [70]

∞ **Les montmorillonites**

Les montmorillonites peuvent être détritiques, par héritage des sols ou des sédiments plus anciens qui les contiennent. Elles peuvent être néoformées en milieu alcalin à partir des autres silicates ou à partir des verres volcaniques. Elles ont une foule d'applications économiques, dans les industries chimiques, les boues de forage, etc. [70].

∞ **Le kaolin :**

D'origine chinoise, «Kaoling», La kaolinite se forme comme produit résiduel météorologique ou comme minerai sédimentaire, dans les sols. Elle est formée dans les conditions de pression et de température de la surface de la terre (25–30°C et de pression atmosphérique). Associe dans son feuillet, une couche de tétraèdres à cœur de silicium et une couche d'octaèdres à cœur d'aluminium. La distance de la surface d'un feuillet à l'autre est de 0,74 nm. Elle appartient au système triclinique [71].

Cette constitution permet l'hydratation des argiles, avec parfois un phénomène de gonflement très important. La plupart des argiles sont thixotropiques. Elles perdent leur rigidité en présentant le comportement d'un liquide lorsqu'elles subissent une sollicitation mécanique, et retrouvent leurs caractéristiques initiales au repos. La souplesse des liaisons entre les feuillets,

permet aux argiles d'avoir un comportement plastique. La dernière propriété des argiles est l'interaction avec les espèces ioniques.

En effet, les charges négatives des argiles sont neutralisées par des cations compensateurs. Or, ces cations peuvent s'échanger avec ceux présents dans le milieu et notamment avec les métaux lourds : c'est le phénomène d'adsorption [72].

En ce qui concerne la matière organique, on retrouve dans les sédiments tous les composés organiques naturels, issus des végétaux, des algues et des animaux, ou bio synthétisés par la microflore, ainsi que les colloïdes humiques. La décomposition de ces matières est très lente (plusieurs centaines d'années) et combine de très fortes propriétés tensioactives et complexantes. Les substances humiques colorent la vase en noir et interagissent avec la partie minérale, provoquant des agglomérations. En général, la proportion massique de matière organique est de l'ordre de 2 à 10 % pour les sédiments des cours d'eaux et elle est constituée à 60% de composés humiques [66].

Enfin, la nature de l'eau contenue dans les vases, appelée « eau interstitielle » afin de la différencier de la colonne d'eau qui se trouve au-dessus, peut être répartie en 4 catégories [72]:

- a) L'eau libre qui n'est pas liée aux fines ;
- b) L'eau capillaire, liée aux fines par des forces de capillarité ;
- c) L'eau colloïdale qui hydrate les colloïdes ;
- d) L'eau adsorbée qui est liée à la surface des particules et constitue un film autour d'elles.

III.5.3. Granulométrie des sédiments

La distribution granulométrique d'un sédiment et plus globalement, de n'importe quel matériau, constitue son empreinte physique. Elle caractérise en effet la taille des particules constituant la phase solide du matériau. D'autre part, la répartition de fréquence de taille des grains explique la répartition des sédiments dans un milieu aquatique. En effet, les grosses particules restent en amont tandis que les plus fines se retrouvent en aval [72].

Les différentes classes granulométriques couramment utilisées sont présentées dans le tableau I.2.

Diamètre	Dénomination
>20 mm	Cailloux
2 mm à 20 mm	Graviers
63 μm à 2 mm	Sables (grossiers et fins)
2 μm à 63 μm	Limons (ou silt)
< 2 μm	Argiles

Tableau I.2 : Classes granulométriques d'un matériau [72].

Une vase est généralement constituée des 3 dernières classes : sables, limons et argiles. Précisons que le terme d'argile utilisé en minéralogie n'a pas le même sens que celui utilisé en granulométrie. Ici, c'est un critère uniquement basé sur la taille des particules et non sur leur composition chimique et minéralogique.

La proportion de sables, limons et argiles d'un sédiment peut varier très fortement en fonction de leur provenance géographique, du lieu de prélèvement (portuaire, estuarien ou fluvial), de la nature de la matière solide, etc. Cependant, la fraction argileuse est généralement prédominante [73].

Pour classer les matériaux fins dont la taille des particules est inférieure à 2 mm, les géotechniciens utilisent le diagramme triangulaire des sols fins de la figure I.29. Ce type de diagramme est particulièrement adapté aux sédiments [74].

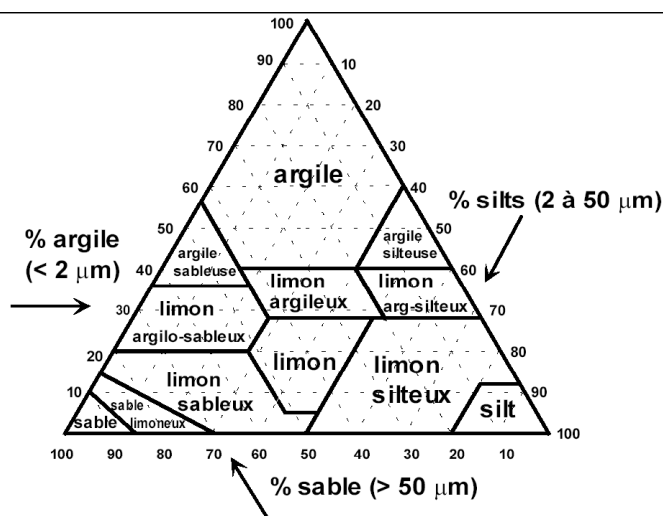


Figure I.29 : Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins [74].

III.5.4. Le dragage des sédiments

Le curage ou bien le dragage constitue alors une opération de restauration, d'entretien voire d'assainissement indispensable à la prévention des risques d'inondation, au rétablissement du tirant d'eau pour la navigation, et aussi à la restauration du milieu naturel [72].

La figure I.30 présente une photo d'un engin mécanique de dragage :



Figure I.30 : engin mécanique de dragage [73].

L'extraction et l'évacuation des sédiments sont les deux phases importantes d'une opération de dragage. En effet, lors de ces phases, les sédiments subissent de nombreuses transformations pouvant modifier leurs caractéristiques et leurs comportements. Ces deux étapes peuvent aussi avoir un impact direct sur l'environnement par la remise en suspension de ces sédiments.

Il y a quatre principales techniques de dragage : dragage en eau, dragage hydraulique, dragage mécanique et dragage pneumatique, [68].

1. **Les dragages en eau** : consiste à la remise en suspension et la dispersion des sédiments par un courant naturel ou artificiellement entretenu et ils sont éparpillés ou transférés vers une zone définie.
2. **Les dragages hydrauliques** : utilisent des pompes centrifuges, aspirant à travers un tube d'élinde, les sédiments sous forme de boues liquides de haute teneur en eau.
3. **Les dragages pneumatiques** : fonctionnent sur le même principe que les dragues hydrauliques mais avec une aspiration générée par des pompes à air comprimé.
4. **Les dragages mécaniques** : agissent par action mécanique d'un outil (benne, godet) directement sur les matériaux à draguer.

La gestion des sédiments dragués se fait suivant 4 grandes filières d'élimination :

- le stockage sous eau,
- la mise en décharge,
- le stockage
- la valorisation.

III.5.5. La valorisation des sédiments de dragage

La valorisation, à chaque fois qu'elle est possible, confère aux produits de dragage une valeur incontestable. Il y a 2 grands domaines possibles d'utilisation des sédiments :

- ✓ L'agriculture ;
- ✓ Le Génie Civil.

Dans notre étude, nous nous intéresserons à la valorisation en Génie Civil.

Le large éventail de technique et de qualité acceptables pour les matières premières dans le secteur du génie civil et des travaux publics permet aux sédiments de dragage de trouver plus facilement un réemploi. Dans le bâtiment, ils peuvent être utilisés pour la fabrication de briques, de mortiers, de bétons de toutes classes de résistance. Dans la route, compte tenu du volume important potentiellement utilisable, constituent une voie privilégiée, ils peuvent être utilisés en tant que matériaux pour remblais, couches de forme, assises de chaussées non traitées ou traitées. Les déchets remplacent ainsi une partie de matériaux traditionnels. Selon les propriétés des sous-produits, trois usages sont possibles : liants, primaire de fabrication, granulats.

Les sédiments traités ayant des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques peuvent être utilisés en tant que liant. Lorsque les sédiments traités sont considérés comme inertes, leur utilisation peut alors être envisagée en tant que granulats.

Semcha [63] a effectué une étude complète sur la caractérisation physique, chimique, minéralogique et mécanique de la vase draguée du barrage de Fergoug (MASCARA), où il a mentionné également la température de calcination optimale d'après Murat (1982), qui se situe entre 700 et 800 °C. Pour une température inférieure à 700 °C, la déshydratation du Kaolin n'est pas totale et pour une température supérieure à 800 °C, il y a diminution du degré d'amorphisation car la recristallisation du métakaolin est entamée. Donc une vase calcinée à 750 °C semble bien donner une vase réactive aussi bien que la pouzzolane de Béni-Saf [63].

Plusieurs thèses de magister et projets de fin d'études ont été réalisés à Oran et Chlef évoquant la possibilité de fabriquer un ciment composé à base de vase calcinée utilisant des dosages de 5 à 20 %.

D'autres études récentes visent à fournir des données sur l'aptitude des sédiments traités comme par le procédé Novosol®, à être utilisés dans le béton. Leur granulométrie étalée entre 0 et 2 mm permet en effet d'envisager à la fois la substitution du ciment ou des fines, et celle des granulats. C'est ainsi qu'a pu être formulé un béton autoplaçant, dont les propriétés à l'état durci (résistance et durabilité potentielle) sont en cours d'étude. La perte de maniabilité induite par les sédiments traités a pu être interprétée par des essais de rhéologie sur pâtes et l'analyse de la surface spécifique par la méthode BET : elle est liée à la structure poreuse des grains et à l'absorption d'eau qui en résulte. La détermination des indices et coefficients d'activité sur mortiers permet d'envisager l'utilisation des sédiments traités en substitution du ciment, avec une efficacité meilleure pour les sédiments cyclonés et tamisés [64].

La figure I.31 présente l'évolution de la résistance a la compression de différents BAP a base de sédiments traités Novosol® :

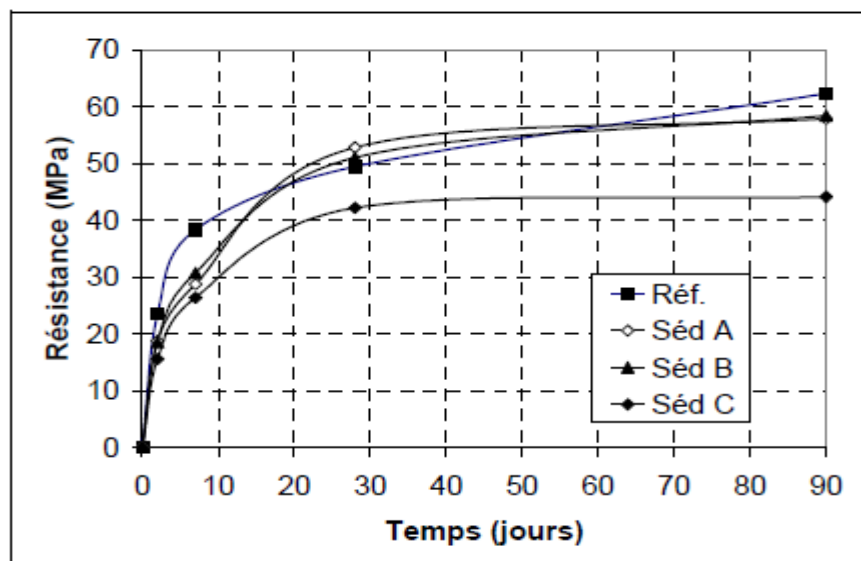


Figure I.31 : Evolution de la résistance en compression en fonction du temps de différents BAP a base de sédiments traités Novosol® [64].

III.6. PRÉSENTATION DU BARRAGE CHORFA

Le barrage Chorfa II (ainsi appelé après la réalisation de sa nouvelle digue) situé dans la daïra de Sig, à une quarantaine de kilomètres du chef-lieu de la wilaya de Mascara de capacité initiale 83 Hm^3 , régularise les eaux du sous bassin de la Mekerra (Oued Mebtouh), et alimente les localités de Oued Mebtouh, Boudjebaha El-Bordj et Aïn Adden et qui relèvent du territoire de la wilaya de Sidi Bel-Abbès. La production actuelle dépasse les $25\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$. Sachant qu'il est d'une capacité de 70 millions de mètres cubes, en raison de la sécheresse qui sévit dans la région, son niveau de remplissage a baissé à 13,5 millions de mètres cubes.

La figure I.32, présente la Situation donnée par satellite du barrage Chorfa II :

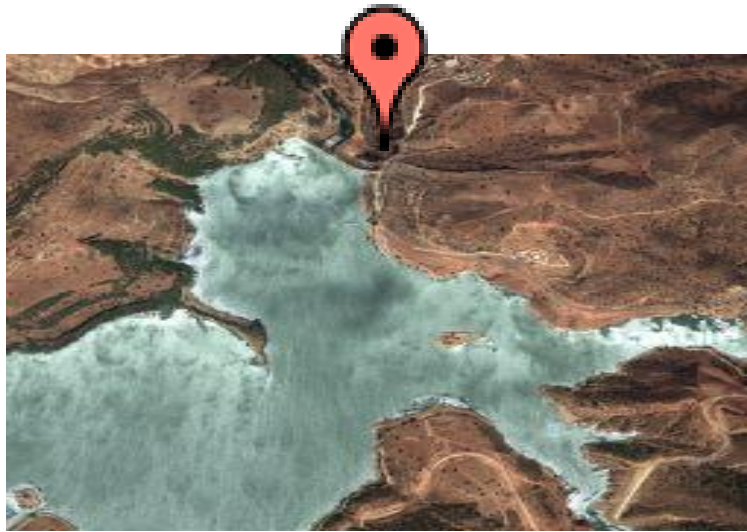


Figure I.32 : Situation donnée par satellite du barrage Chorfa II.

Les figures I.33, I.34 et I.35 présentent des photos réelles du barrage Chorfa II :



Figure I.33 : Vue générale du barrage Chorfa II



Figure I.34 : Vue du côté interne de la digue du barrage Chorfa II



Figure I.35 : La digue du barrage Chorfa II

Le barrage Chorfa II comme beaucoup d'autres en Algérie est soumis à un phénomène d'envasement progressif. Au bout des dernières années sa capacité a chuté d'une dizaine de millions de m^3 ; soit un taux annuel d'envasement dépassant un million de m^3 .

Cela traduit la complexité du problème : construire l'ouvrage, le protéger, le vidanger régulièrement, préserver le site amont et aval, ... La valorisation des produits issus du dragage contribue sans aucun doute au développement de la région et à la résolution des questions liées au largage des vases.

III.7. CONCLUSION

En dépit d'énormes quantités de sédiments présents dans les barrages en Algérie notamment celui de Chorfa II de la wilaya de Mascara, la valorisation de ces sédiments de dragage dans la confection des bétons autoplaçants semble être une alternative bien fondée par rapport aux caractéristiques prometteuses de ces matériaux pour leur devenir.

Plusieurs travaux ont été menés dernièrement pour étudier l'effet des additions minérales sur les propriétés mécaniques et sur la résistance dans les milieux agressifs des mortiers et bétons, soit en substitution d'une partie du ciment soit en addition au béton, mais rares sont les études détaillées réalisées sur les performances des bétons à base de sédiments de dragage et encore moins sur des BAP.

L'objectif de cette étude est de valoriser un sédiment de dragage qui est la vase dragée du barrage Chorfa II après calcination dans la confection d'un BAP et comparer les propriétés physico-mécaniques et de durabilité de ce béton par rapport à un BAP à base de pouzzolane naturelle de la région de Béni-Saf.

Problématique et objectifs de la recherche

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

L'envasement des barrages, conséquence la plus dramatique du phénomène érosif a pris suffisamment d'ampleur en Algérie. En effet, le potentiel hydraulique du pays chute sans cesse au cours du temps notamment au nord africain.

Le bassin versant d'Oued Chorfa est bien connu par son fort taux d'envasement estimé par l'ANB (Agence Nationale des Barrages).

Le dévasement est un moyen de lutte efficace, néanmoins il engendre un autre problème lié au stockage et à l'évacuation de la vase en aval du barrage. En effet le dragage du barrage de Chorfa a constitué un vrai problème écologique dans le périmètre irrigué de Sig.

Après avoir donné les causes et les problèmes provoqués par l'envasement, nous favoriserons une stratégie de réduire les dépôts des sédiments dans les barrages par la réutilisation de la vase extraite.

Le domaine de recherche s'est considérablement développé ces dernières années au vu du coût élevé de la fabrication du ciment (Energie de cuisson du clinker) et ses effets polluants sur l'environnement (dégagement des gaz à effets de serre : (CO₂...etc.).

Ainsi si cette valorisation passe à l'échelle industrielle, les problèmes économiques seront considérablement réduits et une forte économie dans la consommation du ciment serait envisagée.

Le domaine de valorisation et de l'exploitation de la vase des barrages représente pour la recherche un champ encore vierge et insuffisamment exploité ; aucune étude n'a jusqu'à nos jours été menée à son terme pour la valorisation et l'utilisation de ce matériau à l'échelle industrielle, cela est dû essentiellement à la rareté des documents techniques et l'inexistence d'une bibliographie suffisante. Des insuffisances notoires sont notées dans la littérature relative à l'exploitation de la vase en tant que matériau substituable au ciment entrant dans la composition des bétons autoplaçants.

Pour enrichir et approfondir les recherches entamées sur la vase, notre étude a été engagée et qui consiste à la détermination des données techniques pour la fabrication de matériaux en vue de l'obtention d'un béton autoplaçant répondant à des normes acceptables. C'est pour cette raison que nous avons jugé utile d'apporter notre modeste contribution afin de pouvoir valoriser la vase du barrage Chorfa II et donc encourager son utilisation à des fins d'exploitation comme matériau noble entrant dans la composition du béton autoplaçant.

Il s'agit donc de préparer un BAP de qualité remarquable avec des matériaux locaux à partir d'une substitution d'une quantité de ciment par une quantité de vase extraite du barrage de Chorfa II et sa résistance vis-à-vis des attaques sulfatiques et de la carbonatation.

Nous allons donc déterminer les différentes résistances mécaniques et étudier la durabilité des BAP à base de vase (20% de vase substituée au ciment) envers les attaques des sulfates (Na_2SO_4 et MgSO_4), et comparer les résultats obtenus à ceux équivalents à un béton autoplaçant de même classe à base de pouzzolane naturelle en tant que témoin.

Ainsi par cette contribution il nous sera possible de répondre à plusieurs objectifs :

Ecologiques

Il s'agit de procéder à la diminution des quantités de vase stockées en aval du barrage Chorfa II en les évacuant en vue d'une exploitation à des fins industrielles pour la fabrication du béton autoplaçants et par conséquent, par ailleurs, freiner la fabrication du ciment dégageant des gaz à effet de serre aura un impact écologique important qui contribuera à la préservation de l'environnement.

Economiques

Comme toutes les additions minérales (pouzzolane, fillers calcaire, laitier,...), la vase calcinée de Chorfa peut constituer un liant pour la confection des bétons autoplaçants et de ce fait assurer une économie dans la consommation du ciment dont le prix ne cesse d'augmenter et une réduction de sa fabrication portera une économie certaine.

Technologique

L'élaboration des bétons autoplaçants à base de vase à performances égales et éventuellement meilleurs que les bétons ordinaires ou autoplaçants à base d'autres matériaux donnera un véritable succès à la technologie des bétons en général et à celle des BAP en particulier.



Partie II:

Matériaux et Méthodes expérimentales



Chapitre I :
Matériaux utilisés

INTRODUCTION

Ce travail de recherche vise à apporter une contribution à la valorisation de la vase draguée du barrage Chorfa II après calcination en substitution partielle au ciment en tant que pouzzolane de synthèse rentrant dans la composition d'un BAP.

Il s'agit de comparer l'influence de cette vase calcinée sur les caractéristiques physico-mécaniques et sur la durabilité de ce béton autoplaçant à court et moyen terme avec celles apportées par la pouzzolane naturelle de Béni-saf sur le même type de BAP.

Une formulation de Bouhamou [8] a été adoptée dans ce travail de recherche. Elle couvre deux types de bétons autoplaçants de même classe de résistance.

Pour bien concentrer notre travail de recherche sur le substitut pouzzolanique, tous les autres matériaux utilisés (ciment, sable, gravier et adjuvant) sont identiques pour les deux BAP.

Le BAP est caractérisé par des essais spécifiques à l'état frais, pour cela, une étude expérimentale systématique à l'état frais de tous les BAP a été réalisée, Il s'agit des essais suivants :

- l'essai d'étalement au cône d'Abrams,
- l'essai de la boîte en L,
- l'essai de J-Ring,
- l'essai de stabilité au tamis.

A l'état durci, divers essais relatifs aux domaines mécaniques et physiques ont été réalisés afin de mesurer :

- la résistance à la compression
- La résistance a la traction,
- la ségrégation.

En ce qui concerne les essais de durabilité, nous avons réalisé les essais suivant :

- la résistance aux attaques des sulfates Na_2SO_4 et MgSO_4 ,
- la carbonatation naturelle et accélérée.

Chapitre I : Matériaux utilisés

I.1 LE CIMENT

Un seul type de ciment a été utilisé dans la composition des deux BAP : Un ciment CPA CEMI 42,5 provenant de l'usine de Zahana (ouest Algérien). Il contient au moins 95% de clinker. Le reste est composé de constituants secondaires tel que le gypse comme régulateur de prise.

Le choix de ce ciment sans ajout est justifié par l'étude de l'effet de chaque substitut sur les performances des bétons autoplaçants sans qu'il y ait d'interférence avec les autres ajouts présents dans les ciments composés et qui pourraient fausser les interprétations.

Ce ciment présente une résistance moyenne en compression à 28 jours de 42,5 MPa. Sa surface spécifique Blaine est de 318 m²/kg et sa densité de 3,13.

La finesse de mouture d'un ciment est caractérisée par sa surface spécifique ou surface développée des grains contenus dans une masse donnée. La surface spécifique Blaine du ciment a été déterminée par la méthode du perméabilimètre de Blaine selon la norme NF EN 196-6 et exprimée en cm²/g.

La composition chimique du ciment est donnée par le tableau II.1 :

Composants chimiques	Teneur massique (%)
SiO ₂	22.30
CaO	63.60
Fe ₂ O ₃	3.99
Al ₂ O ₃	5.10
MgO	1.43
Na ₂ O	0.34
K ₂ O	0.70
SO ₃	1.24
Perte au feu	1.18
Insolubles	0.36

Tableau II. 1: Composition chimique du ciment utilisé

Sa composition minéralogique illustrée dans le tableau II.2, est obtenue en utilisant la formule de Bogue appliquée au clinker ordinaire.

Constituants	Teneur massique (%) du CEMI 42.5
C ₃ S	58.57
C ₂ S	16.05
C ₃ A	1.43
C ₄ AF	17.11

Tableau II. 2: Composition minéralogique du clinker

La masse volumique apparente est obtenue par la pesée d'un récipient d'un litre rempli de ciment sans aucun tassement.

La masse volumique absolue du ciment a été déterminée, selon NF P 18 – 555, par le pycnomètre et le benzène.

La consistance normalisée de la pâte de ciment est déterminée selon la norme NF EN 196-3 à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une sonde.

Le temps de prise est déterminé selon la norme NF EN 196-3 à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une aiguille.

Ces caractéristiques physiques sont groupées dans le tableau II.1.

L'état du ciment	Caractéristiques	Valeurs
Ciment Anhydre	Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.18
	Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.13
	Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3180
Pâte de Ciment	Teneur en eau pour consistance normale (%)	25.0
	Début de prise	2h 45
	Fin de prise	3h 55

Tableau II.3 : Caractéristiques physiques du CPA CEM1 42.5.

En ce qui concerne la caractérisation mécanique du ciment utilisé CPA CEMI 42.5, on a procédé à la détermination des résistances à la compression et à la flexion d'un mortier de ciment constitué conformément à la norme NF EN 196- 1.

Les résultats des essais mécaniques effectués à l'âge de 28 et 90 jours à raison de 3 éprouvettes par échéance sont représentés dans le tableau II.4.

Ciment	Age	Résistance a la traction (MPa)	Résistance a la compression (MPa)
CEMI 42.5	28 jours	7.2	47.4
	90 jours	8.1	52.3

Tableau II.4 : Caractéristiques mécaniques du mortier normal du ciment CEMI 42.5.

D'où on peut classer ce ciment dans la classe du CPA 42.5 puisque la résistance à la compression à 28 jours (R_{c28}) vérifie [60]:

$$L_s < R_{c28} < L_i$$

Où L_i est la limite inférieure et L_s est la limite supérieure de résistance proposées par le fabricant (Dans notre cas 42.5 et 52.5 MPa respectivement).

I.2. LES LIANTS POUZZOLANIQUES

Ce sont des mélanges de ciment (clinker portland) et de pouzzolane (Naturelle ou Artificielle) dont les proportions doivent être telles que l'on peut combiner la pouzzolane au ciment en question.

Ces liants sont caractérisés par une basicité plus faible, due à la consommation de la chaux par les pouzzolanes, et par des caractéristiques et résistances finales similaires voir meilleurs à celles des ciments portlands tout en économisant une quantité de ciment.

L'évolution chimique des hydrates formés montre qu'il y a d'abord hydratation du clinker et formation de portlandite puis, ensuite réaction pouzzolanique [63].

Les ciments pouzzolaniques sont élaborés avec les deux occupations suivantes :

- ✓ La quantité de produit pouzzolanique nécessaire à combiner avec le ciment.
- ✓ L'évaluation du pouvoir pouzzolanique du substitut.

I.2.1. les Substituts au Ciment

Les bétons autoplaçants sont caractérisés par un volume de pâte plus important que les bétons vibrés. Dans notre étude, ce volume de pâte sera garanti essentiellement par le dosage important de liant équivalent composé de ciment CPA CEMI 42.5 et un des substituts déjà définis dans la partie précédente à savoir : la vase calcinée du barrage Chorfa II et la pouzzolane naturelle de la région de Béni-saf.

I.2.2 La pouzzolane naturelle de Béni-saf

C'est une pouzzolane naturelle d'origine volcanique extraite du gisement volcanique dans la région de Beni-Saf (Algérie). Cette pouzzolane est fournie sous forme de roches concassées de type pierre ponce et scorie (Figure II.1). Pour pouvoir l'utiliser comme substitut dans la composition du BAP, nous avons d'abord procédé à son étuvage à 105°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage, nous l'avons ensuite complètement broyé puis passé au tamis de 80 µm.



Figure II.1: La pouzzolane naturelle utilisée, avant broyage et après broyage.

La poudre résultante a fait l'objet d'une analyse physico-chimique, par d'autres auteurs, dont les résultats sont fournis dans le tableau II.5 [56]:

Composants chimiques	Teneur (%)
SiO ₂	45.67
CaCO ₃	-
CaO	8.98
Al ₂ O ₃	15,1
Fe ₂ O ₃	10.14
MgO	3,45
Na ₂ O	3,00
SO ₃	0,19
HCl	nul

Tableau II.5: Analyse chimique de la pouzzolane naturelle utilisée [56].

Les pouzzolanes naturelles d'origine sédimentaire ont des teneurs en silice encore plus élevées (cas de squelettes siliceux de micro-organisme).

La qualité d'une pouzzolane est liée à sa teneur en verre. Pour étudier la caractérisation de la phase vitreuse de cette pouzzolane, il suffit de calculer, à partir de la composition chimique, la différence entre les teneurs brutes en silice et en chaux (silice-CaO). SI cette différence est inférieure à une valeur seuil de 34%, la pouzzolane ne comporte pas de phase vitreuse [56].

Dans notre cas (silice-CaO=36,69% \geq 34%), donc la pouzzolane comporte une phase vitreuse et elle est active.

L'étude minéralogique par diffractométrie aux rayons X a montré que cette pouzzolane naturelle est vitreuse, et se caractérise par une raie principale de la silice [56].

I.2.3 La Vase Calcinée du barrage Chorfa II

La vase étudiée a été prélevée en aval du barrage Chorfa II dans la zone de rejet.

Après curage, des essais de caractérisation physiques et chimiques ont été effectués sur des échantillons prélevés par soins, et préparés selon les protocoles cités dans la partie 1.

La composition chimique de la vase du barrage Chorfa II permet d'envisager la transformation des structures argileuses stables en structures amorphes, cette transformation nous assure la réactivité pouzzolanique recherchée pour la substitution envisagée.

Nous avons donc concrétisé le processus de préparation et de transformation par traitement thermique de l'échantillon de vase, ce qui nous a permis par la suite de procéder à l'évaluation des caractéristiques physiques et des performances mécaniques de cette vase.

La vase draguée passe par les différentes étapes suivantes :

1. **Séchage** : L'échantillon de vase est d'abord séché par passage à l'étuve (105 °c) afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage ainsi que son tamisage.
2. **Concassage** : La vase étuvée est concassée pour faciliter son broyage.
3. **Broyage** : La vase concassée est totalement broyée.
4. **Tamisage** : La vase broyée est tamisée par voie sèche à travers un tamis de 80 µm où seul le passant est considéré par la suite.
5. **Calcination** : C'est un traitement thermique effectué sur la vase préparée préalablement par cuisson à 750 °c [63].



Figure II.1 : Four de calcination utilisé (+ 1200°C)

La vitesse de cuisson doit être réglée à 5 °c/min afin d'éviter les chocs thermiques, ensuite, la température de cuisson qui est de (750 °c ±5) est maintenue constante pendant 05 heures pour obtenir à la fin le produit final qui est la vase calcinée et qui doit être conservé à l'abri de l'air et de l'humidité dans des sacs hermétiques.



Figure II.3: La vase de Chorfa à l'état naturel, séchée, broyée, tamisée, et calcinée
La composition chimique de cette vase calcinée a été effectuée au laboratoire LTPO, les résultats d'analyse sont représentés dans le Tableau II.6:

Les composants chimiques	Les teneurs %
SiO ₂	55.34
Al ₂ O ₃	15.75
CaO	13.82
Fe ₂ O ₃	7.43
SO ₃	0.17
SO ₄	/
Total	100.22
CaCO ₃	23.5
Carbonates	4.64
CO ₂	2.04
H ₂ O	0.87

Tableau II.6: Caractéristiques chimiques de la vase calcinée

Pour la vase (silice-CaO=41,52% \geq 34%), donc la vase calcinée comporte une phase vitreuse.

La vase calcinée du barrage Chorfa est pouzzolanique Selon la norme ASTM C618 :

$$\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3 = 78,52\% \geq 70\%$$

I.2.3. Caractéristiques physiques des substituts

∅ Les masses volumiques (apparente et absolue)

Les masses volumiques apparentes de la vase calcinée et de la pouzzolane naturelle de Bénisaf ont été obtenues par la pesée d'un récipient d'un litre rempli sans aucun tassement.

Les masses volumiques absolues ont été déterminées, selon NF P 18-555, par le pycnomètre de Le Châtelier et le benzène.



Figure II.4: Pycnomètre de Le Châtelier.

∞ Consistance normale et temps de prise

Les consistances normalisées des pâtes des liants équivalents ont été déterminées selon la norme NF EN 196-3 à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une sonde.

Les temps de prise ont été déterminés selon la norme NF EN 196-3 à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une aiguille.



Figure II.5: Essais de consistance normale et de prise par l'appareil de Vicat

∞ La finesse de mouture (Surface Spécifique Blaine)

C'est la surface développée des grains contenus dans une masse donnée. La surface spécifique Blaine de la vase calcinée et de la pouzzolane naturelle ont été déterminées par la méthode

du perméabilimètre de Blaine selon la norme NF EN 196-6 et exprimée en cm^2/g , dans le laboratoire de la cimenterie LAFARGE située dans la région de Sig.

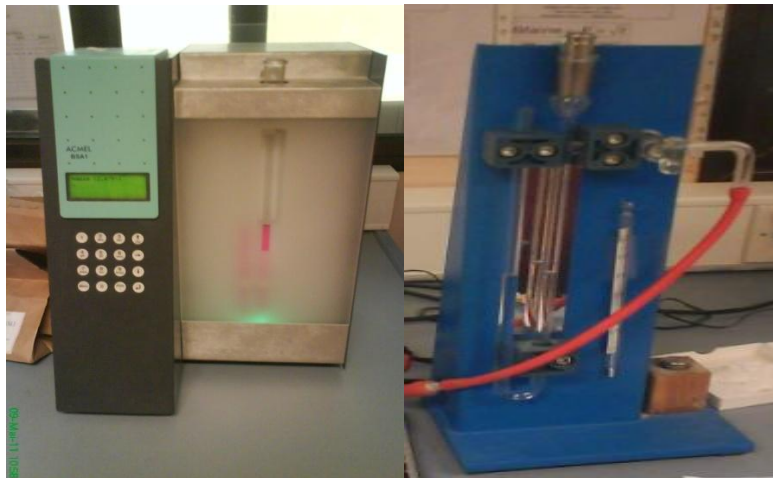


Figure II.6: Perméabilimètre de Blaine automatique et manuel de la cimenterie LAFARGE

∅ L'indice d'activité pouzzolanique

L'indice d'activité, noté i , est défini comme le rapport des résistances en compression $f_p(t)$ et $f_0(t)$, respectivement la résistance du mortier contenant une fraction p d'addition et la résistance du mortier témoin (sans addition). Au sens des normes EN 450 et NFP 18-506, cet indice est déterminé pour $E/C = 0,5$ et $p = 0,25$.

$$i(p) = \frac{f_p(t)}{f_0(t)}$$

Des prismes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ont été confectionnés pour les deux liants équivalents, respectivement à base de pouzzolane naturelle et à base de vase calcinée afin de mesurer les résistances en compression sur les demi-éprouvettes rompues par flexion à 28 et 90 jours.

Les résultats sont présentés dans le tableau II.7 :

Mortier normal à base de	28 jours (MPa)		90 jours (MPa)	
	σ Compression	σ Traction	σ Compression	σ Traction
Pouzzolane	36	6.3	46.5	7.4
Vase Calcinée	46	6.9	50	7.7

Tableau II.7: Valeurs des résistances à la traction et compression des mortiers normaux à base de pouzzolane et de vase calcinée.

Le tableau II.8 récapitule les différents résultats de la caractérisation physique de la vase calcinée et de la pouzzolane naturelle ainsi que les indices d'activité.

Caractéristiques	Pouzzolane naturelle	Vase Calcinée
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.83	0.57
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.73	2.65
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	7023	7830
Teneur en eau pour consistance normale (%)	25.0	28.5
Début de prise	02h 40	02h 30
Fin de prise	03h 40	03h 25
Temps de prise	01 h	55 min
Indice d'activité (i)	0.86	0.97

Tableau II.8: Récapitulatif des caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle et la vase calcinée Chorfa II

L'analyse granulométriques des deux matériaux a été effectuée au laboratoire de la cimenterie LAFARGE, Sig, par un appareil PSD MASRERSIZER, (Voir Figure II.7).



Figure II.7: L'appareil de l'analyse granulométrique des fines

Les résultats de l'analyse granulométrique de la vase Chorfa et de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf utilisées sont représentés par les courbes de la figure II.8 :

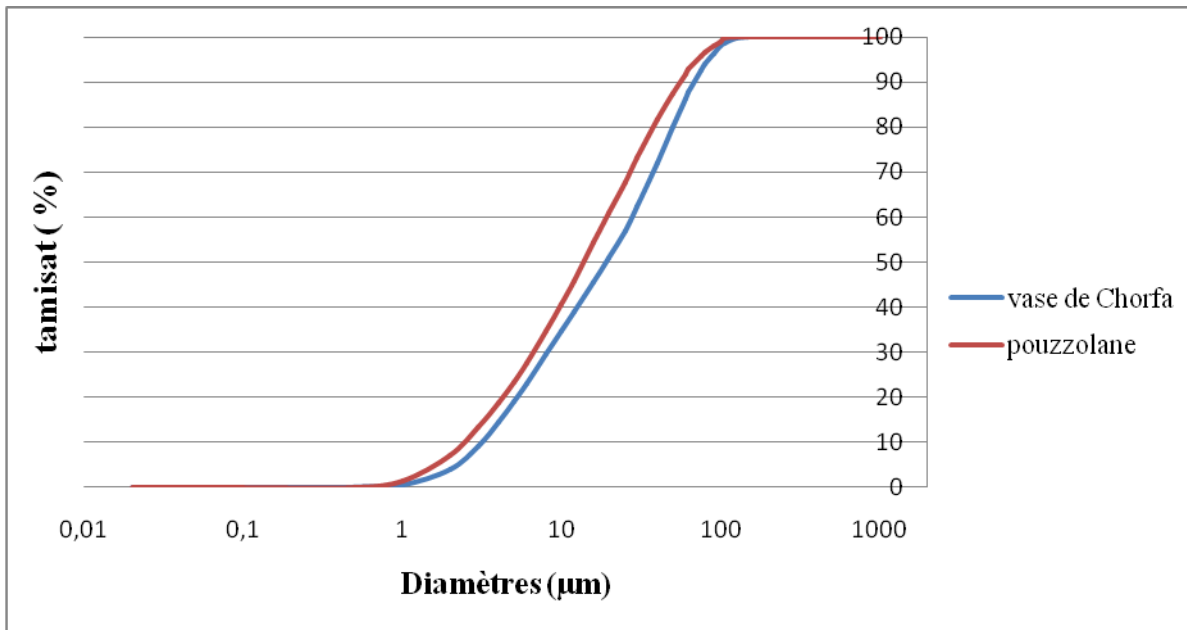


Figure II.8 : Courbes granulométriques de la vase Chorfa et de la pouzzolane naturelle utilisées

I.3. LES ADJUVENTS

Les adjuvants permettent d'obtenir une grande fluidité (superplastifiant) et une parfaite homogénéité (agent de viscosité) nécessaire à l'obtention d'un béton autoplaçant. Les superplastifiants permettent, à E/C constant, d'accroître la maniabilité. De plus, pour qu'ils aient des bonnes propriétés d'homogénéité, les BAP intègrent en complément un agent de viscosité.

Le superplastifiant utilisé est un "MEDAFLOW 113" non chloré à base de copolymère acrylique développé par la société GRANITEX Algérie et conforme à la norme NF EN 934-2. Cet adjuvant améliore la stabilité, limite les risques de ségrégation et rend la formule moins sensible aux variations d'eau et des constituants. Il permet aussi d'obtenir des résistances mécaniques élevées au jeune âge. Les caractéristiques de ce superplastifiant sont données par le tableau II.9.

Masse volumique	1120 kg/m ³
pH	6,5 à 7.5
Teneur en chlore	< 0,1 %
Pourcentage d'extrait sec en masse	36 % ± 1
Plage du dosage recommandée	0,8 à 2,5 %
Nature	Fludifiant et viscosant

Tableau II.9: Caractéristiques du superplastifiant MEDAFLOW 113

I.4. LES GRANULATS

Les granulats utilisés dans notre étude sont issus de la carrière de KRISTEL, sauf le sable de mer qui provient de la carrière de Sidi-Lakhdar.

Les différents granulats ont été lavés et séchés à l'air libre, et on distingue les gravillons et les sables.

Le tableau II.10 montre l'apparence des granulats utilisés :


Désignation	Sable de mer [SM]	Sable de carrière [SC]	Gravier 3/8 [G3/8]	Gravier 8/15 [G8/15]
Apparence				
Nature	Siliceux O/D= 0/4	Calcaire O/D= 0/4	Calcaire O/D=3/8	Calcaire O/D= 8/15

Tableau II.10: Constituants utilisés du squelette granulaire

Les bétons autoplaçants doivent être formulés pour avoir un bon écoulement, et ce, quelque soit la densité de ferrailage. C'est pourquoi le diamètre maximal des granulats doit être faible (généralement inférieur à 16 mm) [3].

Dans notre composition, nous avons utilisé deux sables de fraction 0/4 : un sable de mer naturel et un sable de concassage.

En vue de leur utilisation dans la confection du béton, les sables doivent être soumis à des essais de laboratoire, à savoir l'analyse granulométrique, l'essai de l'équivalent de sable, l'essai au bleu de méthylène et l'analyse chimique. Ces différents essais permettent d'identifier un sable ou de comparer plusieurs sables prévus pour une même application.

Les principales caractéristiques physiques des sables de mer et de concassage et des graviers sont représentées dans les tableaux II.11.

Caractéristiques		S.de mer (SM)	S. de carrière (SC)	Graviers (3/8)-(8/15)
Masse volumique absolue (g/cm ³)		2.56	2.68	2.66
Masse volumique apparente (g/cm ³)		1.48	1.51	1.45
Equivalent de sable	Visuel	87.76	94.48	/
	Piston	83.18	88.96	/
Pourcentage de fines (%)		0.67	1.0	0.33
Module de finesse		1.64	2.63	/
Absorption (%)		1	0.75	0.55

Tableau II.11: Récapitulatif des caractéristiques physiques des sables et graviers utilisés

Les courbes granulométriques du sable de mer, sable de carrière (concassage) et des graviers (3/8) et (8/15) sont présentées dans la figure II.9:

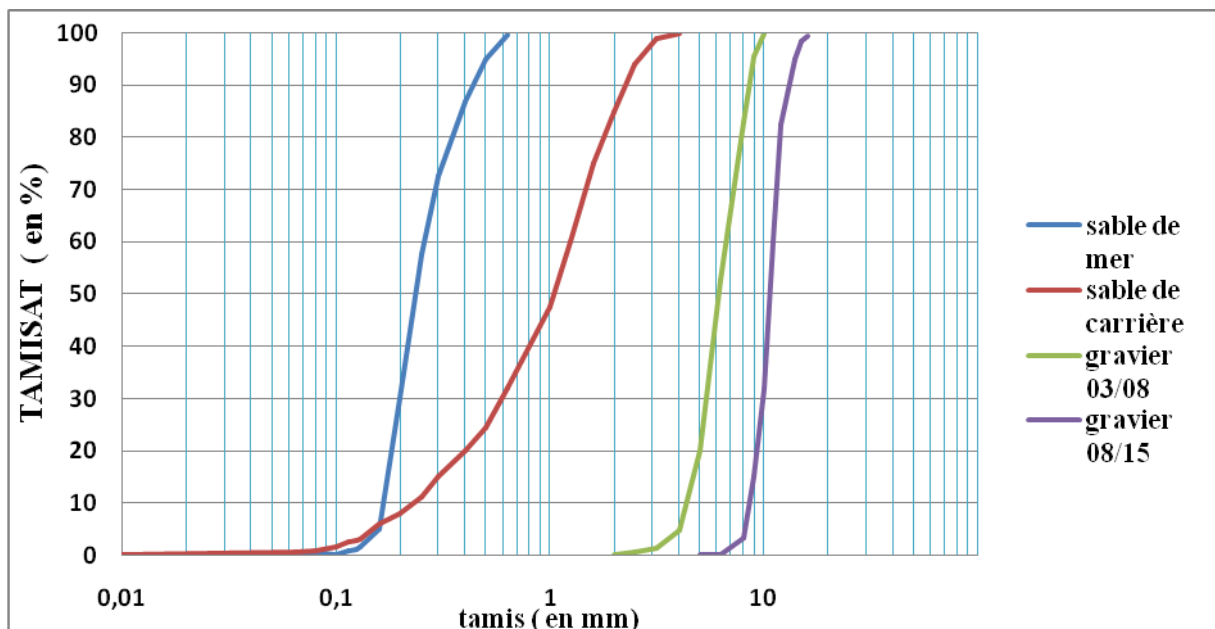


Figure II.9: Courbes granulométriques des sables de mer, de carrière et graviers (3/8), (8/15)

En ce qui concerne l'analyse chimique des sables et graviers, elle a été effectuée par le laboratoire LTPO, Oran. Le sable de concassage (Carrière) et les graviers 3/8 et 8/15 ont la même composition chimique car ils proviennent tous du même gisement de roche calcaire de la région de Kristel, Oran.

Les résultats de l'analyse chimique des granulats sont illustrés dans le tableau II.12 :

Constituants chimiques	Sable de mer (%)	SC, G(3/8), G(8/15) (%)
Silice SiO ₂	75.05	2.06
Chaux CaO	10.34	54.58
Magnésie MgO	0.25	0.14
Alumine Al ₂ O ₃	0.95	/
Oxyde de fer Fe ₂ O ₃	2.67	0.13
Sulfates SO ₄	0.065	/
Chlorures CL	/	/
Perte au feu	10.26	43.32
Total	99.58	100.23
Carbonates	25.49	97.13
Anhydrite carbonique CO ₂	11.20	43.00
Eau de combinaison H ₂ O	0.87	0.32
Sulfates solubles	/	/
Matière organique MO	/	/

Tableau II.12: Analyse chimique du sable de mer de Sidi-Lakhdar et des granulats de Kristel

I.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons identifié tous les matériaux entrant dans la composition des BAP ce qui constitue une étape indispensable avant d'entamer l'étude expérimentale de ces bétons. La vase issue du dragage de Chorfa II a nécessité un traitement thermique qu'on appelle ; la calcination ; afin de la rendre réactive.

Chapitre II :
Méthodes expérimentales

Chapitre II: Méthodes expérimentales

Dans notre étude expérimentale, les BAP ont fait l'objet des caractérisations et des essais présentés sur la Figure II.10:

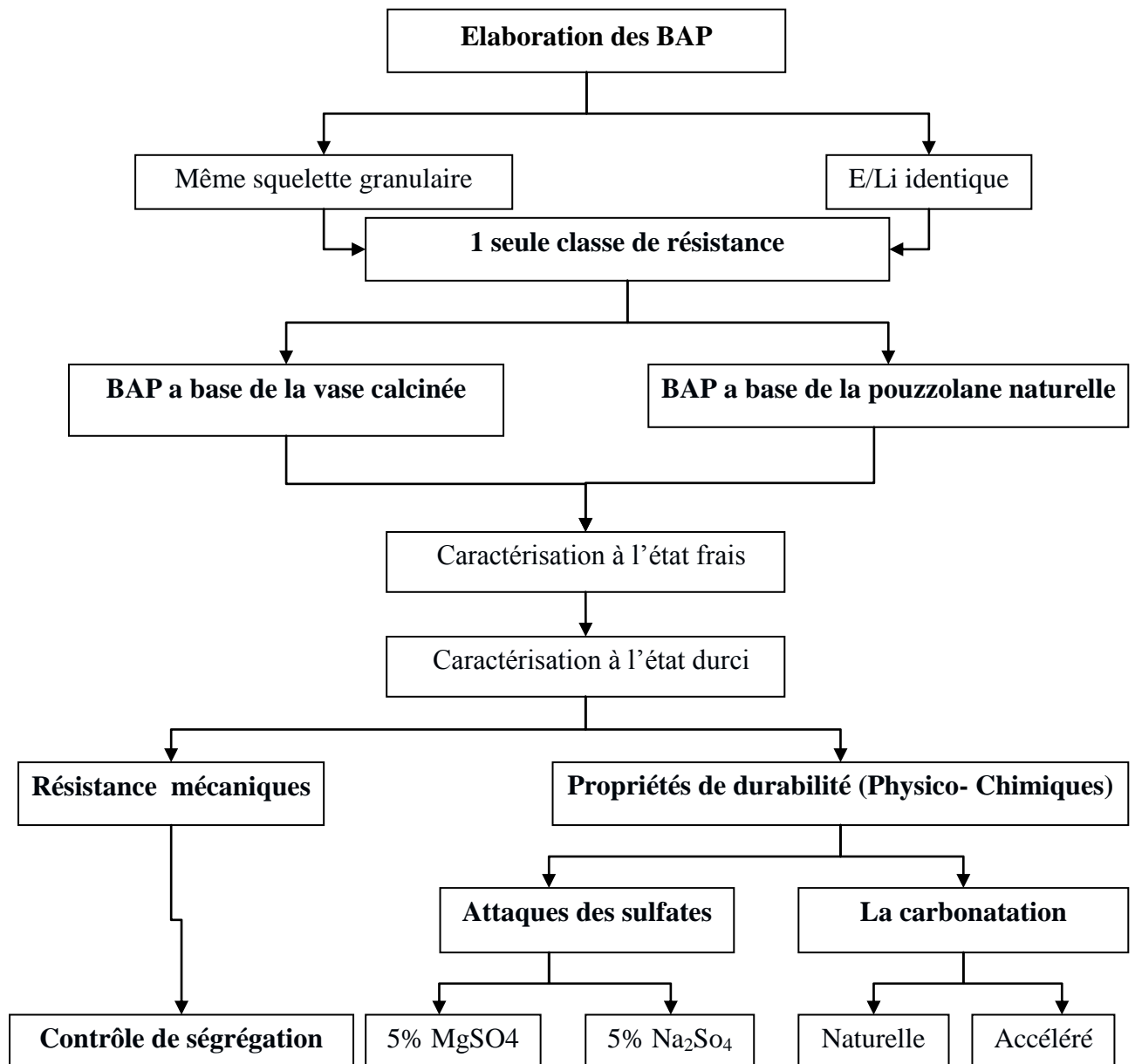


Figure II.10: Organigramme résumant le travail expérimental mené dans cette étude

II.1. ÉLABORATION DES BAP

En tenant compte des différentes données relatives aux matériaux utilisés, nous avons tenté de dériver deux formules de BAP de la formule du BAP à base de fillers calcaires formulé par Bouhamou [8], l'une à base de pouzzolane naturelle de Béni-Saf et l'autre à base de la vase calcinée du barrage Chorfa II, en tenant compte des différentes données relatives aux matériaux utilisés.

Nous avons pu ainsi réduire considérablement le nombre d'essais sur bétons, même si des essais de validation ont été nécessaires suite au changement non souhaité du superplastifiant, qui dans de la formule de base était le «VISCOCRETE 20 HE » de la société SIKA France et qu'on a dû remplacer, faute de disponibilité, par le « MEADAFLOW 113 » de la société GRANITEX Algérie.

Pour s'assurer que les spécifications des cahiers de charges sont bien atteintes, nous avons gardé le même squelette granulaire, le même volume de pâte et le même rapport E/L_{equi} .

Les modifications se sont limitées sur la nature du substitut, donc sur le liant équivalent, et sur le dosage en superplastifiant ajustant les caractéristiques à l'état frais.

Le volume de pâte (eau efficace+air occlus+ciment+additions+adjuvant+ fines des granulats de dimension inférieure à 80 μm) est fixé à 375 litres [8].

L'eau efficace correspond à l'eau totale théorique (eau de gâchage+eau apportée par les granulats+eau apportée par les adjuvants) à laquelle on soustrait l'eau absorbée par les granulats.

Le dosage en adjuvant (superplastifiant et viscosant) est calculé afin de limiter la ségrégation et le ressuage. Ce dosage est déterminé de manière expérimentale à partir d'essais sur bétons frais pour lequel l'étalement doit être compris entre 60 et 75 cm.

L'optimisation de la constitution doit réduire la ségrégation et favoriser l'écoulement. Pour cela et afin de sélectionner une combinaison adéquate de granulats qui améliore la maniabilité et la déformabilité du béton autoplaçant, le rapport gravier sur sable (G/S) est pris égal à 1.

⌘ Préparation du liant équivalent

La préparation du liant équivalent consiste à remplacer 20% du volume du ciment respectivement par de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf et de la vase calcinée du barrage Chorfa II. La comptabilisation des substituts dans le liant équivalent pour le calcul du rapport $E/L_{\text{équi}}$, suit les règles normatives XP 18-305 et EN 206-1.

Où le liant équivalent est donné par l'équation:

$$L_{\text{équi}} = C + k \times A$$

Avec : **C** : la masse de ciment (kg),

K : le coefficient d'activité qui est fonction de l'indice d'activité i ,

A : la masse du substitut utilisée (kg).

Où K est déterminé par la formule: $K=1- [(1/P) \times [1-0.5 \times (E/C)]] \times (1-i)$ ou bien $K=3 \times i-2$

Les deux formulations testées sont présentées dans le tableau II.13 :

Les constituants (Kg/m ³)	Les BAP	
	BAP-PZ	BAP-V
Ciment CPA CEMI 42.5	387	387
Pouzzolane naturelle (PZ)	68	/
Vase Chorfa Calcinée (V)	/	66
Sable de mer (Sm)	560	560
Sable de concassage (Sc)	251	251
Gravier (3/8)	333	333
Gravier (8/15)	499	499
Eau	219.5	218.5
Superplastifiant (Sp)	5.5	7.5

Tableau II.13: Compositions des deux BAP d'étude

Les différentes caractéristiques des deux BAP sont illustrées dans le tableau II.14 :

Caractéristiques	BAP-PZ	BAP-V
Rapport E/L _{equi}	0,505	0.500
SP/C (%)	1,5	2.0
Rapport Substitut/Ciment en Volume (%)	17.05	17.57
Rapport Substitut/Ciment en Masse (%)	20	20
Rapport G/S (en masse)	1,02	1.02
Volume de pâte (l/m ³ .)	375	375
Masse volumique à l'état frais (kg/m ³)	2454	2434
Masse volumique durcie (kg/m ³)	2440	2420

Tableau II.14: Caractéristiques des deux BAP

II.1.1. Confection des éprouvettes

La fabrication des bétons a été effectuée au laboratoire de Génie Civil à l'université des Sciences et Technologies Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, avec un malaxeur de capacité 50 litres. L'ordre d'introduction des constituants et les séquences de malaxage des BAP sont présentés par la Figure II.12.

La mise en place a été effectuée dans les différents moules destinés aux échantillons correspondant aux essais programmés, à savoir :

- des 7×7×7 cm³ destinés aux essais de résistance à la compression et de durabilité,
- des 7×7×28 cm³ destinés aux essais de résistance à la traction par flexion et à la mesure des déformations dues aux attaques des sulfates ainsi pour les essais de la carbonatation.

Une fois coulés, les échantillons ont été recouverts d'un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. Le démoulage a été effectué à un jour d'âge.

L'organigramme suivant résume l'ensemble des étapes suivies lors du coulage des différentes gâchées.

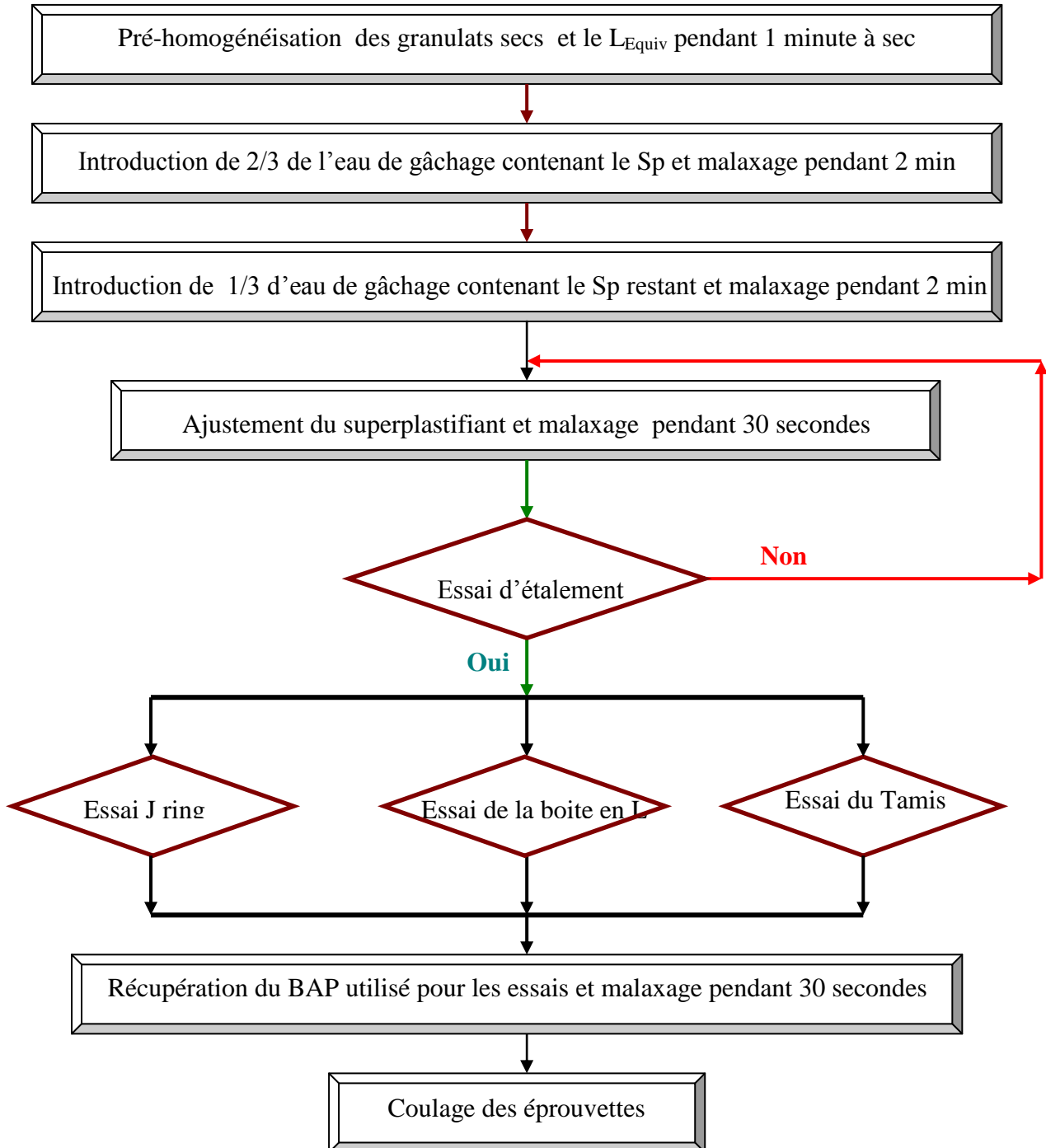


Figure II.11: Organigramme des séquences de malaxage des BAP

II.2. CARACTÉRISATION GÉNÉRALE DES BÉTONS

II.2.1. Etat frais

Une liste non exhaustive des essais de caractérisation des propriétés des bétons à l'état frais a été présentée dans la synthèse bibliographique (voir Partie I, chapitre 1). Cependant, la caractérisation à l'état frais des bétons s'est limitée aux essais recommandés par l'AFGC [1] : étalement au cône, J-Ring, écoulement à la boîte en L, stabilité au tamis et ressuage.

a. L'essai d'étalement

Il s'agit de démouler un cône normalisé DIN (ou cône d'Abrams) de béton frais et de mesurer le diamètre de la galette de béton obtenue. Il faut rappeler qu'est considéré, entre autre, comme autoplaçant, un béton qui forme une galette d'un diamètre compris entre 60 et 75 centimètres.

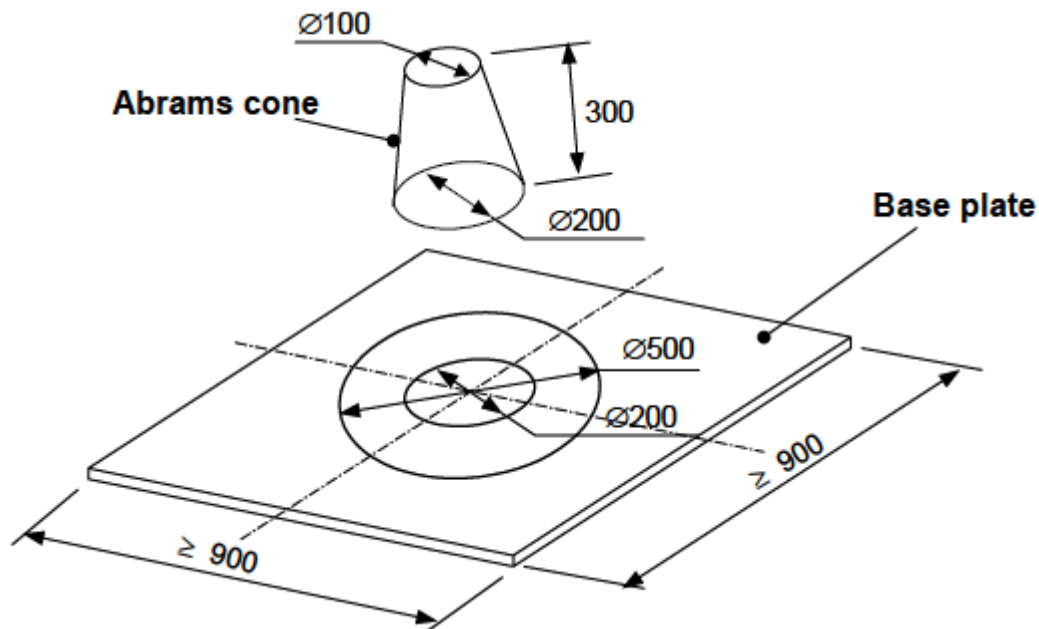


Figure II.12 : Paramètres de l'essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow)

b. L'essai à la boîte en L

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage.

13 litres de béton sont mis dans la partie verticale puis on laisse le béton se reposer pendant 1 minute. La trappe est ensuite levée et le béton s'écoule dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. A la fin de l'écoulement, on mesure h_1 et h_2 et le résultat est exprimé en terme de taux de remplissage h_2/h_1 .

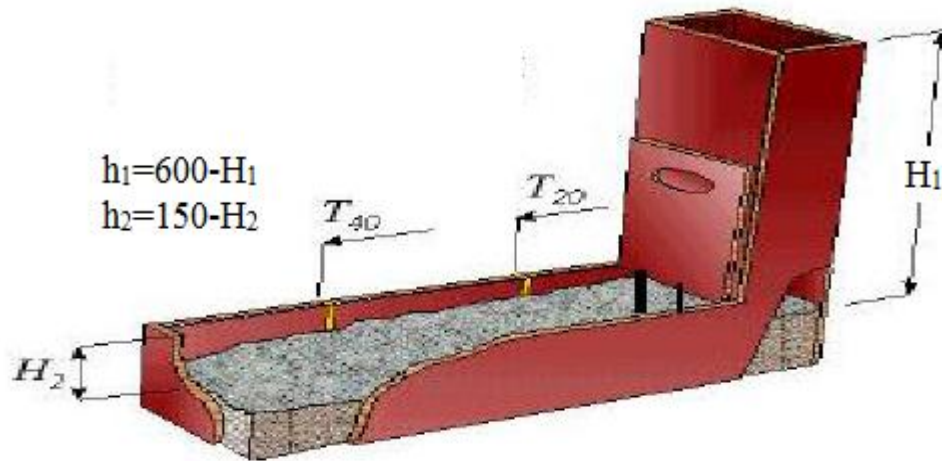


Figure II.13 : Paramètres de l'essai de la boîte en L

c. L'essai J-Ring

Cet essai consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armatures afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. Le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique (Figure II.14). On caractérise donc la tendance à la ségrégation et l'enrobage d'armatures. De plus, la répartition des granulats doit être homogène.

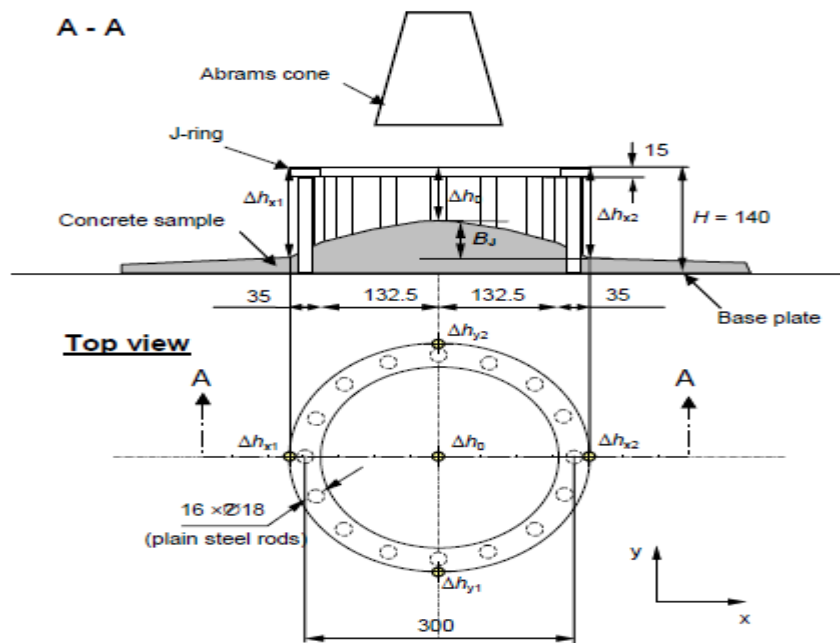


Figure II.14 : Paramètres de l'essai J-Ring

d. L'essai de stabilité au tamis

Il consiste à mesurer la proportion d'éléments fins de béton (laitance) passant au travers d'un tamis d'ouverture 5 mm pour qualifier le béton vis-à-vis du risque de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes :

1. $0\% < P_{\text{Laitance}} < 15\%$: stabilité satisfaisante,
2. $15\% < P_{\text{Laitance}} < 30\%$: stabilité critique,
3. $P_{\text{Laitance}} > 30\%$: stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, BAP inutilisable).

e. L'essai de ressuage

Pour l'essai de ressuage, on a mesuré la quantité de liquide remonté à la surface d'une éprouvette 11 x 40 cm au bout de 3 h, cette éprouvette sera découpée ultérieurement dans le but de caractériser la ségrégation.

Un ressuage important peut entraîner une dégradation de la qualité esthétique des parements et de la durabilité. La valeur limite de ressuage conseillée doit être inférieure ou égale à 3 ‰ en volume.

II.2.2. État durci

a. Résistances mécaniques

Les éprouvettes utilisés pour déterminer les résistances mécaniques du béton étudié selon la norme NF P 18-406 sont des éprouvettes cubiques de $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ pour les essais de compression et des $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ pour les essais de traction par flexion (norme NFP 18- 400) et qui ont été conservées après démoulage dans un bac à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et 100% d'humidité relative jusqu'à l'échéance déterminée (3, 7, 14, 28, 60, 90, 120 jours).

Les essais d'écrasements ont été effectués au laboratoire de matériaux et géotechniques de l'IGCMO, (USTO) Oran.

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 3000 kN, avec une vitesse de chargement aux environs de 0,5 MPa/s.

La figure II.15 présente la presse utilisée pour les essais de compression :



Figure II.15 : La presse utilisée pour les écrasements

La figure II.16 présente la presse utilisée pour les essais de traction par flexion :



Figure II.16: Presse munie d'un dispositif de flexion 3 points

La résistance à la traction par flexion 3 points est obtenue par la formule RDM: $\sigma_f = M_f \times L / (2I)$ qui après développement pour le type $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ devient :

$$\sigma_f = 7.65 \times 10^{-4} \times f \quad (\text{MPa}) \quad \text{Avec } f : \text{effort de flexion en (N)}$$

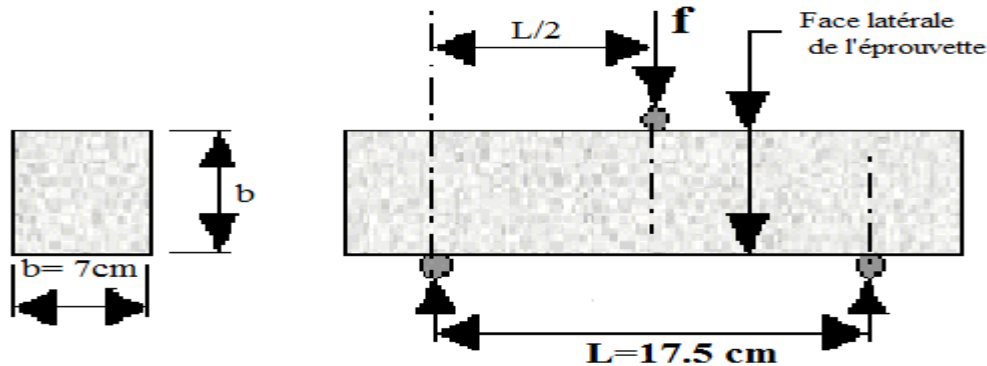


Figure II.17 : Schéma de l'essai de traction par flexion 3 points

b. Contrôle de ségrégation

Un autre moyen de contrôler la ségrégation statique d'un BAP consiste à scier une (ou deux) éprouvette (s) de béton transversalement (forme de disque), au nombre de trois (Disque supérieur, médian et inférieur) et à observer la répartition des granulats sur la hauteur de l'éprouvette.

II.2.3 Essais de durabilité

a. Attaque par les sulfates

Pour évaluer la durabilité des BAP vis-à-vis de l'attaque des sulfates et mettre en relief l'effet de la nature du liant sur la résistivité aux attaques sulfatiques, nous avons suivi l'évolution de:

1. La résistance à la compression après 28, 56, 90 et 120 jours d'attaque de sulfates ;
2. La mesure du gonflement à l'aide d'un rétractomètre périodiquement après mise en solutions ;
3. Le gain ou la perte en poids suite à l'attaque par les sulfates après chaque semaine d'immersion.

Les échantillons d'essais ont été préparés au laboratoire de matériaux du département de génie civil de l'université des sciences et technologie, Mostaganem. Les bétons ont été confectionnés conformément aux prescriptions de la norme EN 196-1:

Le démoulage a lieu 24h après le coulage; par la suite les éprouvettes sont mises directement dans l'eau saturée en chaux jusqu'au jour de l'immersion dans les solutions agressives.

Après la cure des échantillons dans une solution saturée en chaux, destinés à l'étude de la durabilité vis-à-vis des sulfates, ces derniers sont mis dans trois milieux différents afin de suivre l'effet des attaques.

Les milieux de conservations sont :

- ❖ 5% Na₂SO₄ sulfate de sodium ;
- ❖ 5% MgSO₄ sulfate de magnésium ;
- ❖ Eau douce comme témoin.



Figure II.18: Epreuves d'essais immergées dans une solution sulfatique.

Selon la norme ASTM C1012-04, le pH de la solution de sulfate doit être compris entre 6 et 8 et la solution doit être renouvelée chaque semaine, ce qui nécessite des quantités considérables de sulfate de sodium et de sulfate de magnésium. Pour cela, nous avons adopté la méthode de Mehta qui recommande la correction de la solution déjà utilisée, par l'ajout d'une quantité d'acide sulfurique (0,1 N H₂SO₄) jusqu'à l'obtention du pH de la solution de départ (entre 6 et 8). La correction est réalisée quotidiennement au cours des premières semaines d'essai, ensuite elle devient hebdomadaire. Les solutions sont renouvelées tout les 2 mois. La vérification du pH se fait au moyen de papier-pH.

Pour évaluer la durabilité des BAP vis-à-vis de l'attaque aux sulfates nous avons été amené à faire les essais suivants :

✓ **Résistance à la compression**

Les essais sont effectués sur des éprouvettes $(7 \times 7 \times 7) \text{ cm}^3$, nous avons pris la moyenne des résultats de l'écrasement en compression des 3 éprouvettes à chaque échéance prévu (14,28, 60,et 90 jours).

✓ **Le suivi du poids**

Le suivi de l'évolution de la masse des éprouvettes de béton est effectué sur des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}$ conservées dans l'eau saturée en chaux pendant 28 jours, après cette période de cure les éprouvettes sont pesées pour déterminer la masse initial avant immersion dans la solution sulfate (M_0), puis immergées dans les trois solutions suivantes :

5% Na_2SO_4 (sulfate de sodium), 5% MgSO_4 (sulfate de magnésium) et l'eau douce comme témoin (pour pouvoir comparer les résultats d'attaque).

Le mode opératoire suivi pour chaque mesure consiste à retirer de son milieu de conservation l'éprouvette, l'essuyer avec un tissu sec et la laisser pendant 30 minutes à l'air libre du laboratoire. Ensuite, la pesée est effectuée puis enregistrée. L'éprouvette est ensuite remise dans son milieu de conservation.



Figure II.19: Pesée d'une éprouvette de béton

La variation de la masse de chaque éprouvette est calculée à partir de l'équation suivante :

$$VM \% = \left[\frac{M_0 - M_i}{M_0} \right] \times 100$$

Avec VM : variation de la masse en (%) ;

M_0 : la masse de l'éprouvette avant exposition à l'attaque acide en (gramme) ;

M_i ($i=1, 2, 3, \dots, 12$) : la masse après 1, 2, ..., 12 semaines d'attaque en (gramme).

✓ *Suivi du gonflement*

Les mesures de gonflement ont été mesurées grâce à un rétractomètre sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$, selon la norme NF P 15-433, elles ont été conservées dans l'eau saturée en chaux pendant 28 jours, après cette période de cure les éprouvettes sont immergées dans les deux solutions sulfatiques citées dans le paragraphe précédent.

Cet essai est effectué selon le mode opératoire recommandé par norme ASTM C1012.

Un rétractomètre équipé d'un comparateur de longueur adaptée à la taille des éprouvettes et d'une barre étalon, sont nécessaires pour effectuer l'essai (figure II.20).

Avant chaque mesure, on procède toujours au nettoyage des deux extrémités de l'éprouvette.

Le suivi de la variation de longueur de chaque échantillon est réalisé durant 90 jours de conservation (3 mois) dans les milieux sulfatiques et le milieu témoin.



Figure II.20: Rétractomètre pour la mesure du gonflement sur une éprouvette de béton $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$.

b. Carbonatation naturelle et accélérée

L'essai de carbonatation accéléré a été réalisé après 28 jours de conservation dans de l'eau. Les éprouvettes utilisées sont de forme prismatique, de dimensions de $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$. Deux éprouvettes sont utilisées pour les mesures de la profondeur de carbonatation et deux sont utilisées pour suivre l'évolution de la masse. L'enceinte utilisée à cet effet est réglée à une proportion volumique de 50 % de dioxyde de carbone.

Avant le démarrage de l'essai de carbonatation accéléré, les échantillons sont placés durant 48 heures dans une étuve ventilée réglée à une température de $40 \pm 2^\circ\text{C}$ (pour favoriser la carbonatation). Les échantillons sont alors pesés puis disposés dans l'enceinte de carbonatation.

Les échéances de mesure de l'épaisseur de béton carbonaté sont les suivantes : 7, 14, 28 et 60 jours. A chaque échéance, les échantillons sont retirés de l'enceinte et les épaisseurs de béton carbonaté ainsi que les variations des masses sont mesurées. Un morceau de béton (épaisseur $3 \pm 1 \text{ cm}$) est prélevé sur chaque éprouvette par fracturation par fendage. Les corps d'épreuve résiduels sont ensuite replacés immédiatement dans l'enceinte.

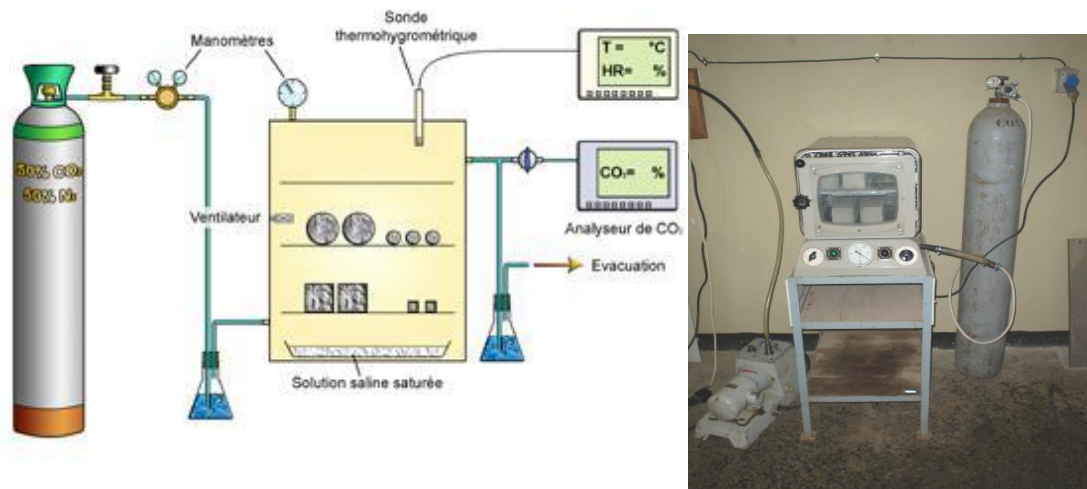


Figure II.21: Schémas et enceinte de la carbonatation accélérée

Les mesures de l'épaisseur de béton carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphaléine. Cette dernière révèle l'interface entre la zone saine et la zone carbonatée. Les mesures correspondent aux distances (en mm) entre la surface externe du béton et le front de coloration, en dehors de zones particulières (coins et interfaces pâte granulat).

Pour pouvoir comparer les résultats de la carbonatation accélérée et celle naturelle, trois éprouvettes supplémentaires (7x7x28 cm³) ont été confectionnées pour chaque BAP. Les éprouvettes ont été placées à l'air libre au laboratoire pour suivre l'évolution de la carbonatation naturelle.

II.3. CONCLUSION

Ce travail expérimental a pour objectif de comparer les performances physico-mécaniques et la durabilité d'un béton autoplaçant à base de liant incorporant de la vase calcinée du barrage Chorfa II à celui à base de liant incorporant de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf.

Nous avons adopté pour chaque BAP le même rapport Eau/Liant ($Liant = C+k \times L$), le même squelette granulaire et le même volume de pâte.

Pour qualifier les performances des deux BAP, de nombreux essais ont été définis :

Certains sont liés au domaine physico-mécanique, comme les essais de résistance à la compression et à la traction. D'autres concernent les propriétés de durabilité telles que la résistance vis-à-vis de la carbonatation et les milieux chimiquement agressifs (tels que les sulfates).

Tous ces essais devraient permettre néanmoins dans un premier temps, la détermination des propriétés révélatrices, directe ou indirecte, de l'influence de la vase calcinée sur les performances des BAP et leur durabilité.



Partie III:

Résultats et Analyses



Chapitre I :
Etat frais

Chapitre I : État frais

I.1. INTRODUCTION

Cette partie présente, les résultats des travaux expérimentaux qui ont été réalisés dans le cadre de notre recherche, ainsi que des interprétations fiables à ces résultats.

Les essais ont été effectués selon les procédures décrites par l'AFGC [1]. De plus, pour les essais d'étalement au cône et d'écoulement à la boîte en L, des temps d'écoulement intermédiaires ont été mesurés. Pour le premier essai, il s'agit du temps nécessaire pour atteindre un diamètre d'étalement de 50 cm, noté t_{50} , et des temps nécessaires pour des écoulements horizontaux respectifs de 20 cm (T_{20}) et 40 cm (T_{40}) à matérialiser sur le fond de la boîte en L, qui sont mesurés pour estimer la viscosité du béton.

I.2. CARACTÉRISTIQUES A L'ÉTAT FRAIS

a) L'étalement au cône

Les valeurs d'étalement spécifiés (figure III.1) des deux BAP (BAP-PZ et BAP-V) dépassent les 60 cm qui représentent la limite inférieure acceptable pour ce type d'essai ce qui implique que cette exigence a été convenablement remplie par les deux BAP. En ce qui concerne les temps d'étalement (t_{50}), bien qu'aucune limite ne soit donnée pour ces derniers, les temps mesurés pour atteindre une galette de 50 cm de diamètre (t_{50}) sont proches à la valeur couramment rencontrée (3 secondes). Leurs étalements laissent présumer que le béton a des propriétés autoplaçantes.

L'auréole de laitance des deux compositions de BAP, à la périphérie des galettes de béton est absente ou très faible (de 1 à 2 mm). De plus, les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton.

Malgré l'augmentation du dosage en superplastifiant pour le BAP-V, l'étalement a légèrement diminué mais tout en restant acceptable vis-à-vis les recommandations de l'AFGC.



Figure III.1 : Aspect de la galette d'étalement

b) La ségrégation dynamique

La ségrégation dynamique des deux BAP est caractérisée par l'essai de la boîte en L qui est exploité au travers du taux de remplissage (rapport des hauteurs de béton en fond et en début de boîte), il doit être supérieur à 0,8 [1]. Les deux BAP vérifient cette condition.

Néanmoins le BAP-V, malgré son dosage élevé de superplastifiant, il présente un taux de remplissage moins important que celui du BAP-PZ.

La figure III.2 présente l'aspect des BAP lors de l'essai de la boîte en L.



Figure III.2 : Aspect de l'essai de la boîte en L

c) La ségrégation statique

La ségrégation statique des BAP a été caractérisée par l'essai de la stabilité au tamis (figure III.3) qui permet de calculer un taux de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Les deux BAP ont un taux de ségrégation inférieur à 15%, synonyme d'une stabilité correcte.



Figure III.3 : Aspect de l'essai de la stabilité au tamis

d) La ségrégation due au phénomène de blocage

Cette propriété a été bel et bien caractérisée par l'essai de l'anneau japonais (J-Ring) (figure III.4), où les diamètres des galettes de béton résultantes de cet essai on bien atteints voir dépassés les valeurs exigées par ce dernier, ainsi que les valeurs du (t_{50}) et les différences d'épaisseurs entre la partie de la galette à l'intérieur de l'anneau et celle à l'extérieur de l'anneau se qui signifie une absence de blocage au travers des armatures.



Figure III.4 : Aspect de l'essai J-Ring

Le tableau III.1 regroupe les résultats des essais de caractérisation des deux BAP à l'état frais.

Essais		Bétons	BAP-PZ	BAP-V
L'étalement	\varnothing (cm)		66	63
	t_{50}		2.90	2.29
Boîte en L	h_2/h_1 (%)		82.13	84.69
	t_{20} (s)		1	1.4
	t_{40} (s)		1.8	1.9
J Ring	\varnothing (cm)		59	57
	B_j		1.42	0.88
Stabilité au tamis	%		6.22	5.57

Tableau III.13: Récapitulatif des résultats de caractérisation des deux BAP à l'état frais.

I.3. CONCLUSION

Toutes ces observations montrent, pour les deux types de bétons autoplaçants élaborés, que chaque type de ciment pouzzolanique (Liant équivalent) a une incidence directe sur le comportement rhéologique des BAP. Le type et la marque du superplastifiant peut également avoir son importance, vu le dosage nettement plus important que celui de la formule de base avec du recule; même si négligeable; de maniabilité. Par conséquent, il convient d'attacher une importance toute particulière au type et marque des adjuvants pour atteindre au mieux les propriétés visées d'un BAP à l'état frais.

Nous avons aussi constaté une chute de maniabilité dans le BAP-V comparé au BAP-PZ et ce malgré le dosage nettement plus important en superplastifiant. Cette chute de maniabilité peut être liée à l'éventuelle structure poreuse des grains et à l'absorption d'eau qui en résulte.

Néanmoins, les deux BAP vérifient l'ensemble des recommandations exigées par l'AFGC.

Chapitre II :
Etat durci

Chapitre II : État durci

II.1. INTRODUCTION

Les résultats présentés dans ce chapitre caractérisent les propriétés mécaniques des bétons autoplaçants étudiés à savoir ; résistance mécanique en compression et la résistance à la traction (et leur évolution dans le temps) ainsi qu'un contrôle de ségrégation afin de visualiser en œil vif la répartition des granulats dans l'ensemble du béton et confirmer l'homogénéité des mélanges adoptés.

II.2. CONTRÔLE DE SÉGRÉGATION

Un des moyens de contrôler la ségrégation statique d'un BAP consiste à scier une éprouvette de béton durci (coulés verticalement depuis le haut) transversalement (sous forme de disques), au nombre de trois (disque supérieur, médian et inférieur) et à observer la répartition des granulats sur la hauteur de l'éprouvette (voir figure III.1.4).

Ces photographies illustrent bien le fait que les deux formulations de BAP présentées ici (BAP-PZ et BAP-V) ne sont pas sujettes à la ségrégation statique. Les granulats sont en effet régulièrement répartis sur toute la hauteur des éprouvettes sciées.

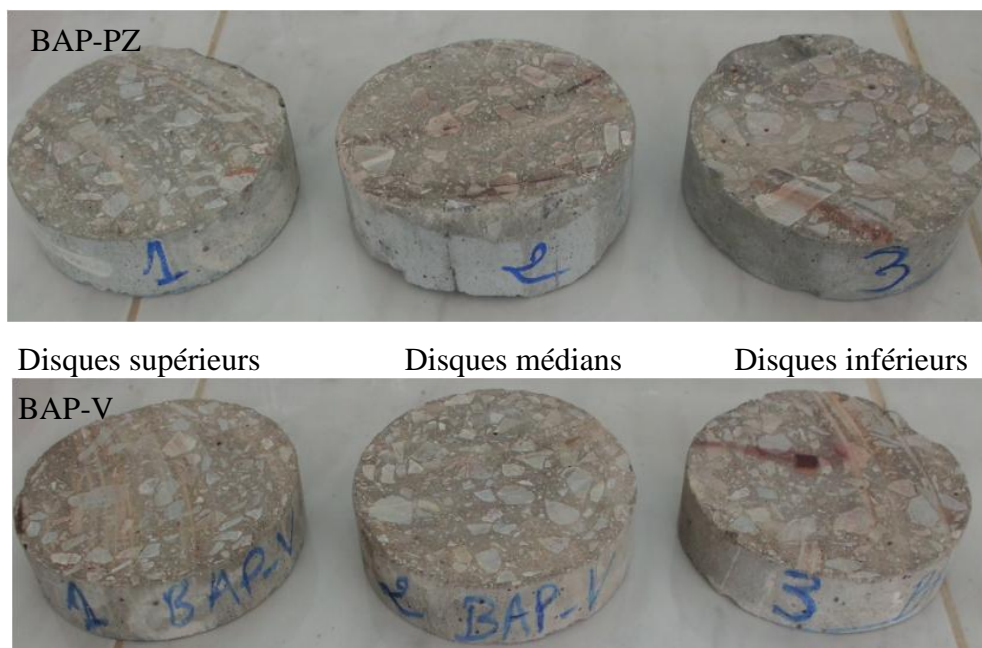


Figure III.5: Observation de la répartition des granulats

III.3. RÉSISTANCES MÉCANIQUES

A l'instar des bétons classiques, la résistance à la compression est une caractéristique essentielle des BAP et l'un des paramètres fondamentaux de notre étude. Cette résistance mécanique a été mesurée à différentes échéances. Elle représente la moyenne des résistances d'une série de trois éprouvettes cubiques de dimension $(7 \times 7 \times 7)$ cm³ soumises à l'écrasement et les résultats sont présentés sous forme de graphique (figure III.6).

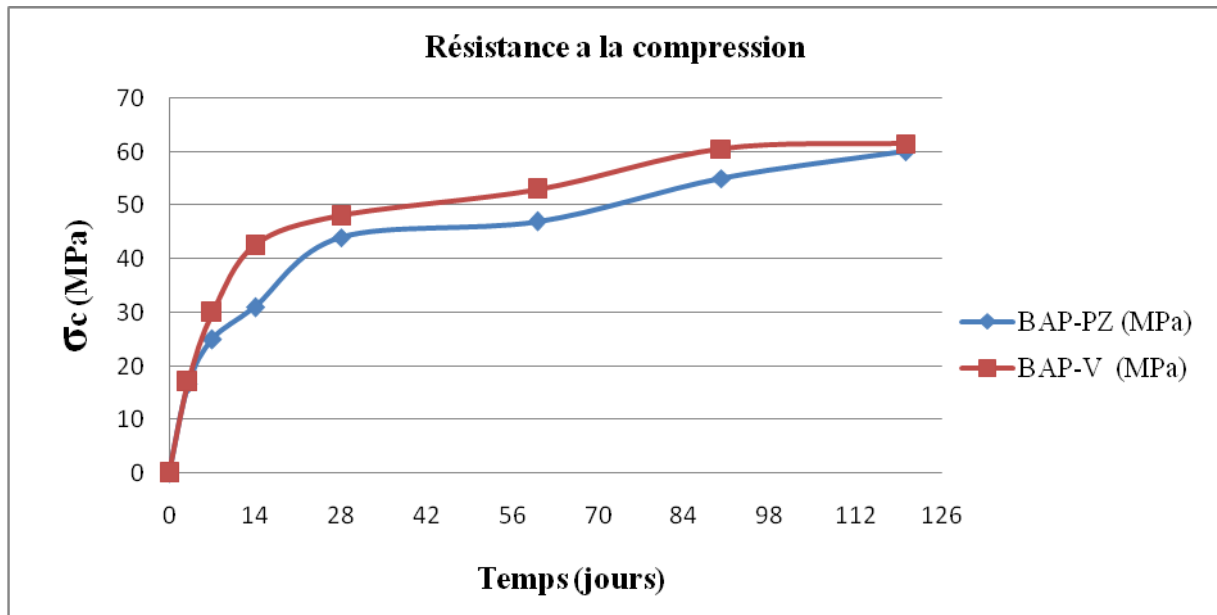


Figure III.6: évolution des résistances mécanique à la compression du BAP-PZ et du BAP-V en fonction du temps.

En comparant les valeurs de résistances enregistrées pour les deux BAP, on remarque que celle du BAP-V est supérieure à celle du BAP-PZ jusqu'à 28 jours où ils atteignent respectivement environ 78% (44 MPa) et 74% (48 MPa) de la résistance à la compression finale. Après 28 jours, elles demeurent pratiquement identiques avec une légère supériorité pour les BAP-V pour converger vers la même valeur (≈ 61 MPa) à l'âge de 120 jours.

En effet, on remarque que l'incorporation de la vase calcinée dans la formulation du BAP-V génère une accélération de sa résistance mécanique au jeune âge. Les particules de la vase lorsqu'elles sont bien défloculées par le superplastifiant, favorisent l'hydratation du ciment et de la vase, principalement par un effet physique et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence visible sur la résistance mécanique avant et après 28 jours.

Cela s'explique aussi probablement par la différence du dosage en superplastifiant dans le BAP-V à cause de l'éventuelle structure poreuse des grains de la vase, et de la légère différence de surface spécifique Blaine en faveur de la vase.

En ce qui concerne les résistances à la traction effectuée par flexion à trois points, les valeurs enregistrées semblent satisfaisantes et il n'y a aucune différence flagrante à signaler. On peut dire ainsi que le BAP-PZ et le BAP-V ont pratiquement le même comportement vis-à-vis des contraintes de traction.

Les valeurs mesurées sont représentées dans la figure III.7.

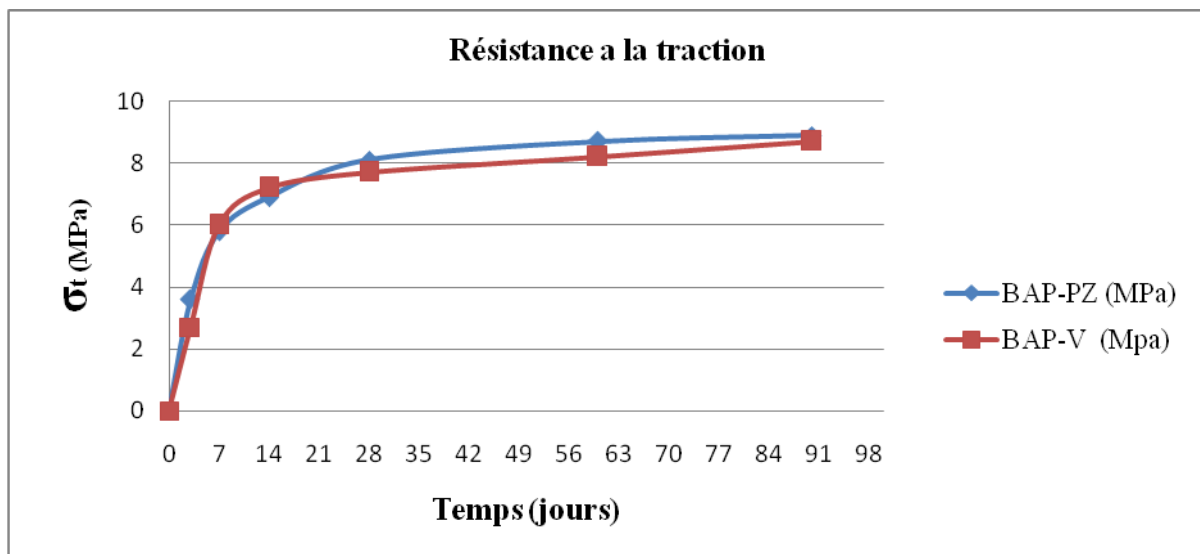


Figure III.7: évolution des résistances mécanique à la traction du BAP-PZ et du BAP-V en fonction du temps.

II.4. CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif de comparer les résistances mécaniques des deux BAP à base de vase calcinée du barrage Chorfa II et de pouzzolane naturelle. Nous avons adopté pour chaque béton le même rapport $E/L_{\text{équi}}$.

Les résultats obtenus montrent, pour les deux types de bétons autoplaçants élaborés, un comportement satisfaisant vis-à-vis de la ségrégation statique et que chaque type de ciment pouzzolanique (Liant équivalent) a une incidence directe sur la résistance mécanique à la compression des deux BAP et particulièrement au jeune âge en faveur du BAP-V et insignifiante pour celle à la traction. Le dosage en superplastifiant peut également avoir son importance, vu le dosage nettement plus important dans le BAP-V.

Chapitre III :
Durabilité

Chapitre III : Durabilité

III.1. INTRODUCTION

La plupart des processus de détérioration touchant les structures en béton, impliquent les transferts de matière (en particulier d'agents agressifs) à l'intérieur de ces matériaux poreux. Il est couramment prétendu que meilleure est la résistance d'un béton à ces transferts, plus durable sera celui-ci. 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 BAP sont connus par leur structure dense ce qui les qualifie de matériaux plus résistants par rapport aux bétons ordinaires vis-à-vis des phénomènes affectant la durabilité.

Les résultats présentés dans la suite de ce chapitre touchent par conséquent les propriétés chimiques des deux bétons autoplaçants élaborés à savoir le BAP-PZ et le BAP-V caractérisant leur durabilité vis-à-vis des attaques chimiques (action des sulfates et du CO_2).

III.2. LES ATTAQUES SULFATIQUES EXTERNES

L'attaque par les sulfates peut détériorer très significativement le béton dans un laps de temps relativement court (10 à 15 ans). L'attaque externe se produit lorsqu'un matériau cimentaire se trouve en contact direct avec une source de sulfate. Les sources peuvent être très variées : eaux et sols riches en gypse, sulfates issus de produits industriels, d'engrais ou de substances organiques, sulfates de l'eau de mer, ..., etc.

Dans cette partie d'étude, nous avons testé la résistance chimique des deux BAP vis-à-vis de deux types de sulfates très présents dans la nature, à savoir, le sulfate de sodium (Na_2SO_4) et le sulfate de magnésium (MgSO_4).

Les essais consistent à suivre les masses, les déformations et les résistances à la compression des échantillons immergés dans des solutions de : 5% Na_2SO_4 et 5% MgSO_4 .

Parallèlement à l'immersion dans les solutions sulfatiques, d'autres échantillons issus de chaque formulation ont été immergés dans l'eau douce. Cet environnement sert comme témoin, les résultats de l'immersion dans la solution sulfatique sont comparés à ceux de la solution témoin.

III.2.1 Milieu témoin (l'eau douce)

III.2.1.a Variation de la masse dans la solution témoin

La figure III.8 montre la variation de la masse des éprouvettes des deux bétons en fonction de la durée d'immersion dans l'eau douce. Le gain de masse est calculé par rapport à la dernière mesure avant immersion.

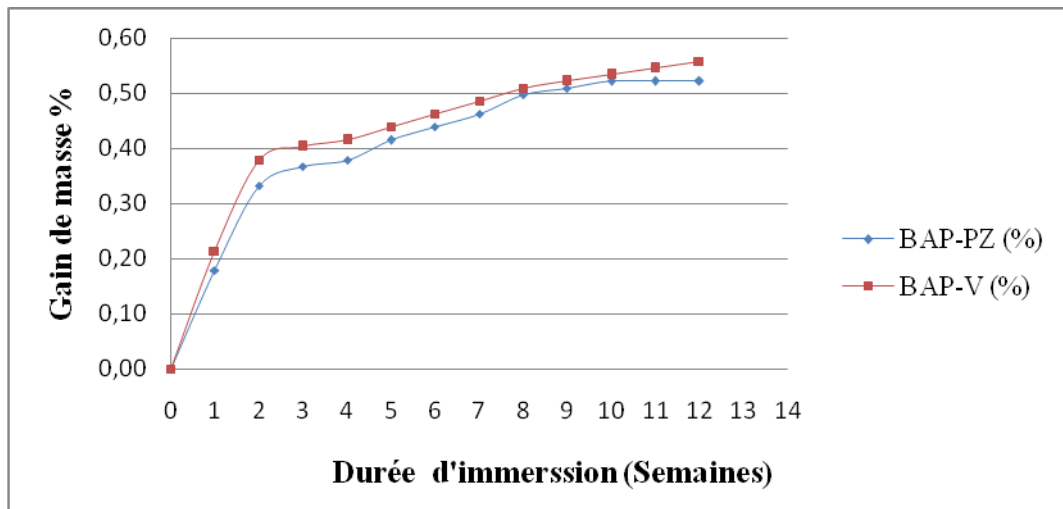


Figure III.8: Variation de la masse des échantillons immergés dans l'eau douce

Nous constatons à partir de la figure III.8 que les deux bétons présentent un gain de leurs masses respectives. Ce gain évolue en fonction de la durée d'immersion. La comparaison entre les deux BAP montre que la cinétique du gain en masse est pratiquement la même pour les deux BAP avec une légère supériorité pour le BAP-V. Cela est probablement dû à la structure poreuse éventuelle des grains de la vase, mais les taux de gain de masse restent très acceptables et cela est dû probablement aux grandes surfaces spécifiques Blaine des deux poudres (vase et pouzzolane) qui engendrent une grande finesse du réseau poreux et une faible diffusivité des deux BAP.

On remarque que l'accroissement du taux de gain est plus important durant les deux premières semaines puis l'accroissement devient progressif mais moins rapide que celui des deux premières semaines, ce qui est attribué à la continuité de la formation d'hydrates dans les deux bétons et probablement à la formation de couches denses de calcite (CaCO_3) sur la surface des éprouvettes. Ces couches ont pour origine la présence des ions carbonates qui se combinent aux ions calcium, issus majoritairement de la dissolution de la portlandite mais aussi provenant directement de la solution d'eau douce.

III.2.1.b. Les déformations longitudinales dans la solution témoin

Les variations dimensionnelles mesurées sur des éprouvettes ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) des deux BAP conservés dans l'eau douce sont représentées sur la figure III.9. La dernière mesure avant immersion est prise comme référence pour le calcul des déformations.

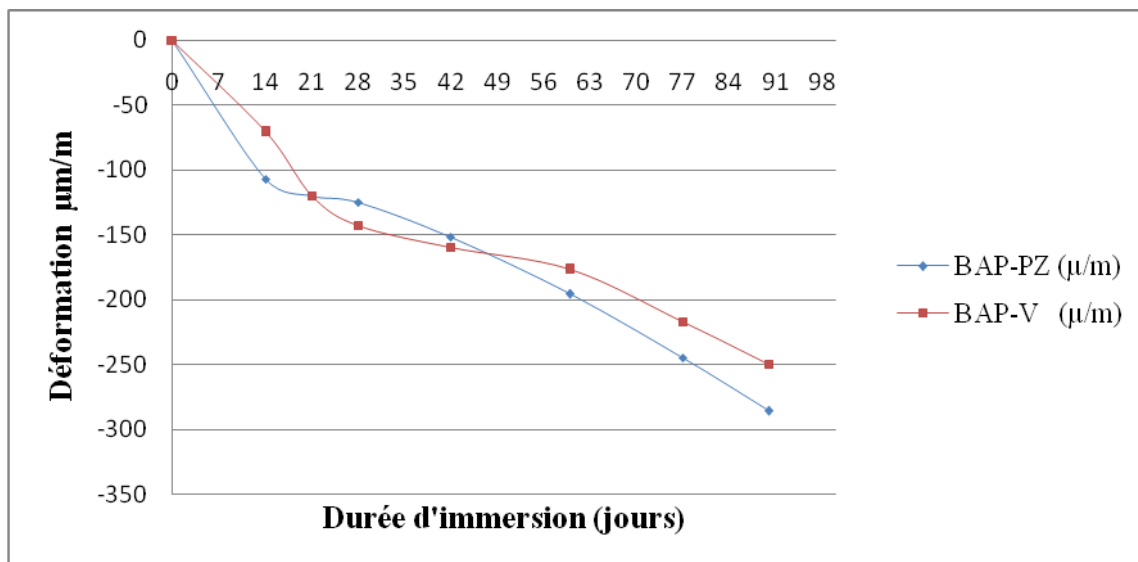


Figure III.9: Evolution des déformations des deux BAP après immersion dans l'eau douce

Les résultats traduits par les courbes présentées dans la figure III.9 indiquent un retrait qui évolue en fonction de la durée d'immersion, pour les deux BAP.

Différents comportements peuvent être établis à partir de ces courbes: la première, est un retrait qui augmente rapidement au cours des 21 premiers jours. Entre 21 et 60 jours, il y a stabilisation partielle des déformations du BAP-V qui retrouve sa 1^{ère} cadence après 60 jours.

Le retrait des bétons conservés dans l'eau peut être attribué à l'avancement de l'hydratation et à la formation de la calcite ou/et encore à la lixiviation des principaux constituants du ciment hydraté (portlandite en premier lieu). En effet, comme le pH de la solution interstitielle est proche de (13,5), la plupart des environnements aqueux naturels (comme l'eau douce) sont partiellement agressifs vis-à-vis du béton et un échange ionique avec l'extérieur peut se produire au sein de la porosité capillaire.

La stabilisation des retraits peut être due à la saturation d'un grand pourcentage des pores capillaires par l'eau introduite par phénomène d'absorption. Ce pourcentage est apparemment plus important dans les BAP à base de pouzzolane que dans ceux à base de vase, et/ou à la

diminution des échanges ioniques entre l'eau (solution d'immersion) et la solution interstitielle.

La différence entre la progression des différents retraits est généralement faible (<50 µm/m entre les deux BAP).

III.2.2. Milieux sulfatiques (Na₂SO₄, MgSO₄)

Les sulfates peuvent altérer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques.

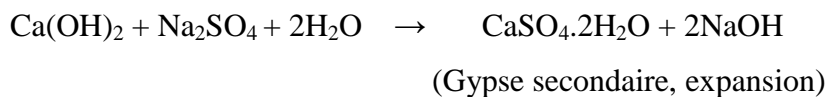
- Expansion
- Perte de propriétés liantes des C-S-H

III.2.2.a Interactions sulfatiques

- **Formation de gypse secondaire**

a) Sulfate de sodium Na₂SO₄

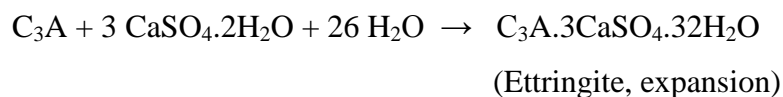
Substitution ionique entre la portlandite et les sulfates selon l'équation suivante :



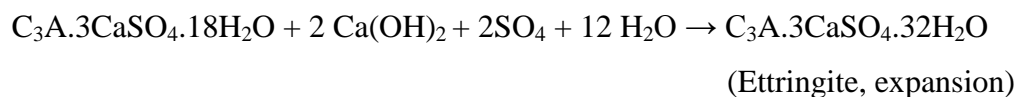
- **Formation d'ettringite secondaire**

Le gypse secondaire formé par la réaction précédente, participe à la formation de l'ettringite secondaire à partir du C₃A anhydre résiduel ou les aluminates hydratés (monosulfoaluminates), selon les deux équations suivantes :

-) à partir du C₃A anhydre résiduel



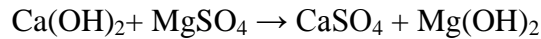
-) à partir des aluminates hydratés (Monosulfoaluminates)



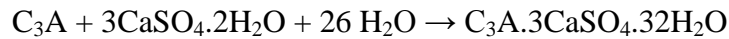
b) Sulfate de magnésium MgSO₄

Le MgSO₄ engendre une double action : la formation d'ettringite et la substitution des ions Ca²⁺ en Mg²⁺ qui le rendent très agressif par rapport au sulfate de sodium,

- **Formation de produits expansifs**



Mg(OH)_2 : c'est la brucite et elle est caractérisée par une faible solubilité et un faible pH.



(Ettringite, expansion)

- **Substitution des ions Ca^{2+} par les ions Mg^{2+} dans les C-S-H**



(Le gel M-S-H est faiblement cohésif)

Le silicate de magnésium hydraté (Mg-S-H) ainsi formé n'a pas de propriétés liantes, et par conséquent la pâte hydratée devient molle et incohérente.

L'attaque des sulfates engendre donc deux types de produits, un gypse secondaire peu expansif et l'ettringite secondaire qui est la cause principale de l'altération des bétons en milieux sulfatés.

III.2.2.b Variation de la masse dans les solutions sulfatiques

La figure III.10 représente l'évolution de la masse des éprouvettes immergées dans les solutions sulfatiques (Na_2SO_4 et MgSO_4).

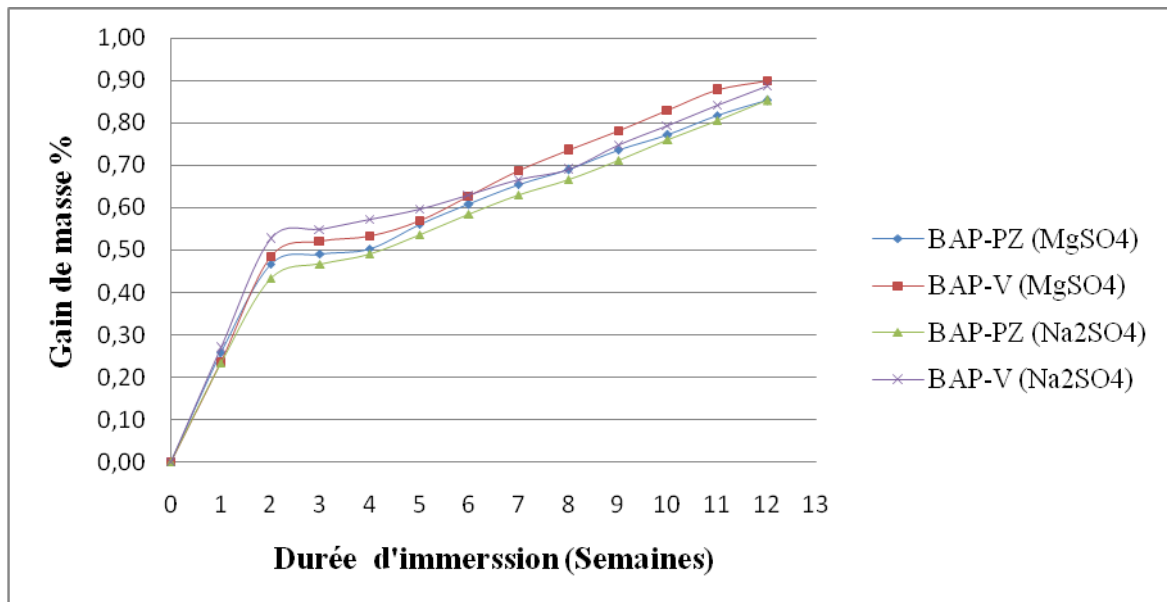


Figure III.10: évolution Evolution de la masse en fonction du temps des éprouvettes du BAP immergées dans des solutions sulfatiques.

On constate qu'il y a une augmentation de la masse dès le premier jour pour les BAP immergés dans 5% de $MgSO_4$ et 5% de Na_2SO_4 .

L'augmentation de la masse est régulière et importante pour toutes les éprouvettes des deux BAP durant les deux premières semaines d'immersion. Cette évolution est attribuée à la continuité de la formation des hydrates dans les différents bétons, et à la formation du gypse et de l'ettringite secondaire suite à la réaction entre les hydrates et particulièrement la portlandite et les sulfates des solutions.

Après les deux premières semaines, l'augmentation de la masse continue mais avec une cadence beaucoup moins importante qu'avant. Et cela est du probablement à la saturation d'un grand pourcentage des pores capillaires par la solution du milieu agressif et des produits volumineux tels que gypse secondaire, ettringite secondaire, le silicate de magnésium hydraté et la brucite, issus des réactions chimiques ainsi l'augmentation du pH qui en résulte et qui influe sur le transfert.

Les éprouvettes de BAP immergées dans la solution sulfatique $MgSO_4$ se distinguent par une augmentation de la masse moyennement plus importante que celle des éprouvettes immergées dans la solution sulfatique Na_2SO_4 , cela peut être expliquée par la formation de la brucite ($Mg(OH)_2$) dans les éprouvettes de la solution sulfatique $MgSO_4$, et qui est un produit très peu soluble.

Par comparaison entre les deux BAP, nous pouvons remarquer que le BAP-V présente un gain de masse plus important que celui du BAP-PZ, et cela peut provenir de l'eau qui remplit les pores éventuels des grains de la vase.

III.2.2.c Comparaison des gains de masse entre milieu témoin et milieux sulfatiques

La comparaison a été faite par évaluation de la différence entre la variation de la masse des éprouvettes conservées dans les solutions des sulfates de sodium et magnésium et celles des éprouvettes conservées dans l'eau douce. Les résultats sont rapportés sur les figures III.11 :

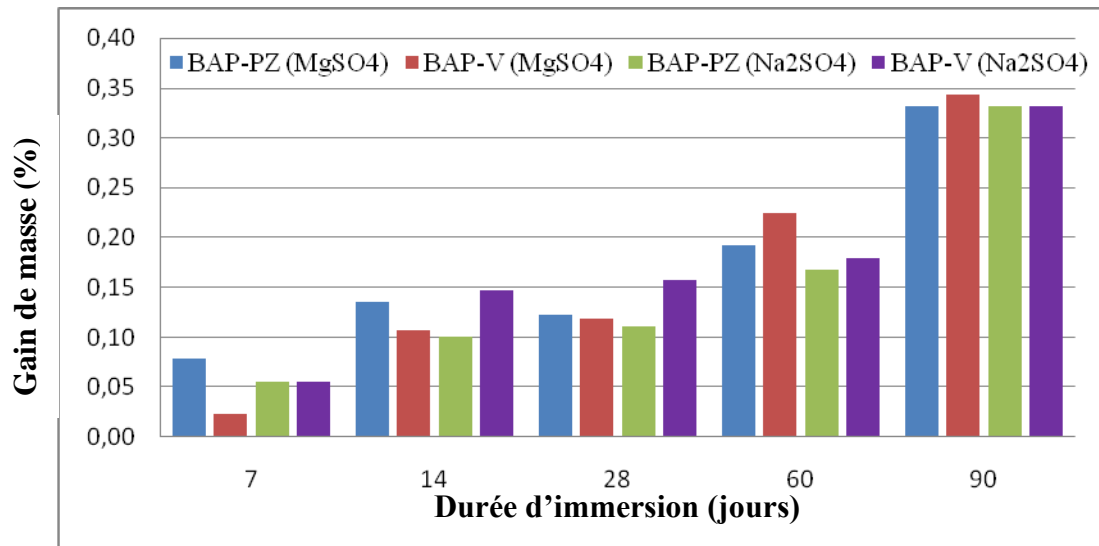


Figure III.11: Différences de variation de masse entre éprouvettes soumises à l'attaque des sulfates et éprouvettes témoins

Les valeurs des différences de variation des masses entre les éprouvettes soumises à l'attaque des sulfates et les éprouvettes témoins jusqu'à 28 jours d'immersion semblent un peu difficile à interpréter et cela à cause des paramètres instables de cette période à savoir le flux de transfert et le pH des solutions d'immersion. Cependant après 28 jours on constate une stabilisation dans les résultats qui vont dans le sens des constatations et interprétations du paragraphe précédent.

III.2.2.d Les déformations longitudinales dans les solutions sulfaciques

Les déformations mesurées sur des éprouvettes ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) des deux BAP conservées dans les solutions sulfatiques sont représentées sur la figure III.12. La dernière mesure avant immersion est prise comme référence pour le calcul des déformations.

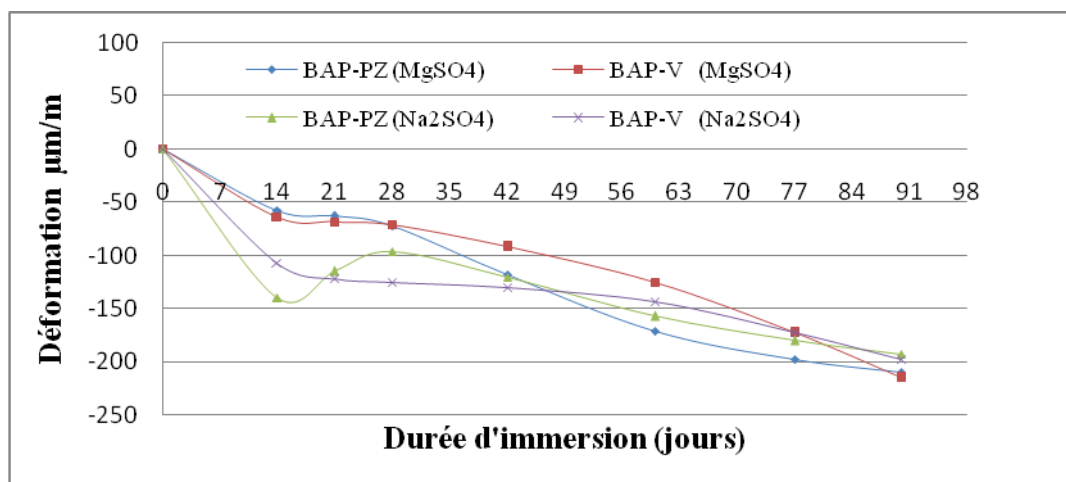


Figure III.12: Evolution des déformations après immersion dans les solutions sulfatiques.

La figure III.12 montre, pour les éprouvettes de bétons immergées dans la solution Na_2SO_4 , une évolution plus accentuée du retrait dès les premiers jours d'immersion, par rapport à celles des éprouvettes immergées dans la solution MgSO_4 .

Le retrait de ces bétons peut être attribué, tout comme celui des bétons conservés dans l'eau douce, à l'avancement de l'hydratation et à la formation de la calcite ou/et encore à la lixiviation des principaux constituants du ciment hydraté (portlandite en premier lieu). Mais on remarque que la cinétique de l'évolution du retrait est différente à celle des éprouvettes immergées dans l'eau douce, et cela à cause de l'éventuel phénomène de gonflement développé en parallèle au retrait. Ce qui expliquerait aussi la différence constatée des valeurs du retrait enregistrée entre BAP-PZ et BAP-V en faveur de ce dernier.

III.2.2.e Comparaison des déformations entre milieu témoin et milieux sulfatiques

La différence des déformations enregistrées dans les différents milieux : témoin qui est l'eau douce et les solutions sulfatiques, peut être considérée comme un gonflement dû à l'effet des sulfates. Elle est représentée dans la figure III.13 :

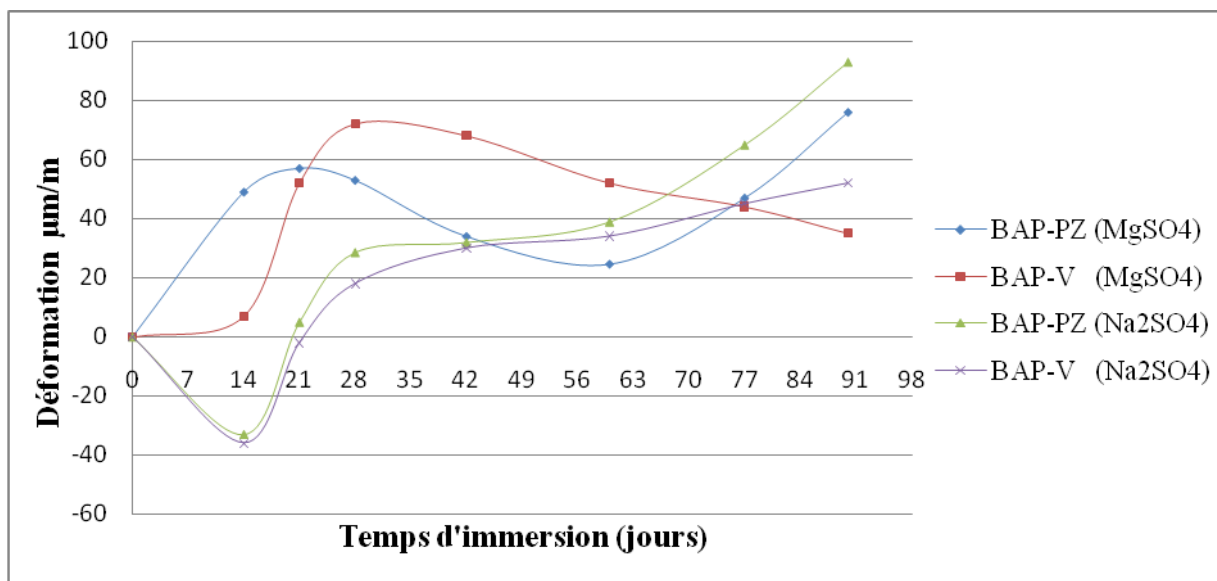
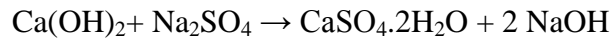


Figure III.13: différence entre les déformations dans le milieu témoin et les milieux sulfatiques

Dans la solution Na_2SO_4 , on constate qu'il y a un retrait dans les 14 premiers jours mais dès le 20^{ième} jour il y a un début de gonflement c'est-à-dire il y a un changement de cinétique. Ce comportement est dû dans les premiers jours :

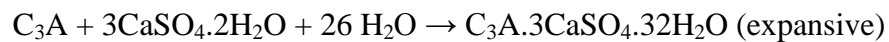
À la substitution ionique entre la portlandite et les sulfates de sodium selon la formule suivante :



NaOH : Se caractérise par une alcalinité élevée ce qui assure la stabilité des C-S-H.

CaSO₄·2H₂O : produit qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydratée, dans la majorité des cas, il n'y a pas ou peu d'expansion.

Dans les jours qui suivent il y'a formation de l'ettringite secondaire, à partir du C₃A anhydre résiduel selon la formule chimique suivante :



Dans la solution MgSO₄, on constate d'après la figure III.13 que l'agressivité a commencé dès les premiers jours de l'immersion. Un gonflement d'environ 55µm/m a été enregistré à 21 jours. Au-delà de 28 jours on note une diminution du gonflement qui continue pour le BAP-V mais qui change pour la BAP-PZ dont la cinétique du gonflement reprend après 75 jours d'immersion.

Le gypse et l'ettringite, formés dans toutes les éprouvettes occupent un volume plus grand que celui des composants solides à partir desquels ils se sont formés, leur formation causant ainsi le gonflement et la fissuration de la pâte dû à la formation de brucite, l'ettringite et la substitution des ions pour les éprouvettes immergées dans la solution MgSO₄.

Le gonflement des BAP-V conservés dans les deux solutions se stabilise voir diminue dans la solution MgSO₄ contrairement à celui du BAP-PZ qui na cessé d'augmenter après avoir été en diminution dans la solution MgSO₄ et stabilisée dans la solution Na₂SO₄, Ce phénomène s'explique probablement par l'épuisement de la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane naturelle face au Ca(OH)₂ libéré par l'hydratation du CPA. La silice réactive interagit avec le Ca(OH)₂ libéré par l'hydratation du CPA ce qui donne à la pouzzolane naturelle et artificielle la propriété de fixer la chaux, mais La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante les premiers jours.

III.2.2.f Evaluation de la résistance à la compression

Les résistances à la compression ont été suivies sur des éprouvettes de $(7 \times 7 \times 7)$ cm³ immergées dans les solutions sulfatiques et comparées à celles des éprouvettes de même type conservées dans l'eau douce en tant que témoin. Les échéances de mesure sont : le jour de l'immersion, après 14 jours d'immersion, après 60 jours et après 90 jours d'immersion.

La figure III.14 montre l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la durée d'immersion des deux BAP d'étude, conservés dans les solutions : Na₂SO₄, MgSO₄, et l'eau douce :

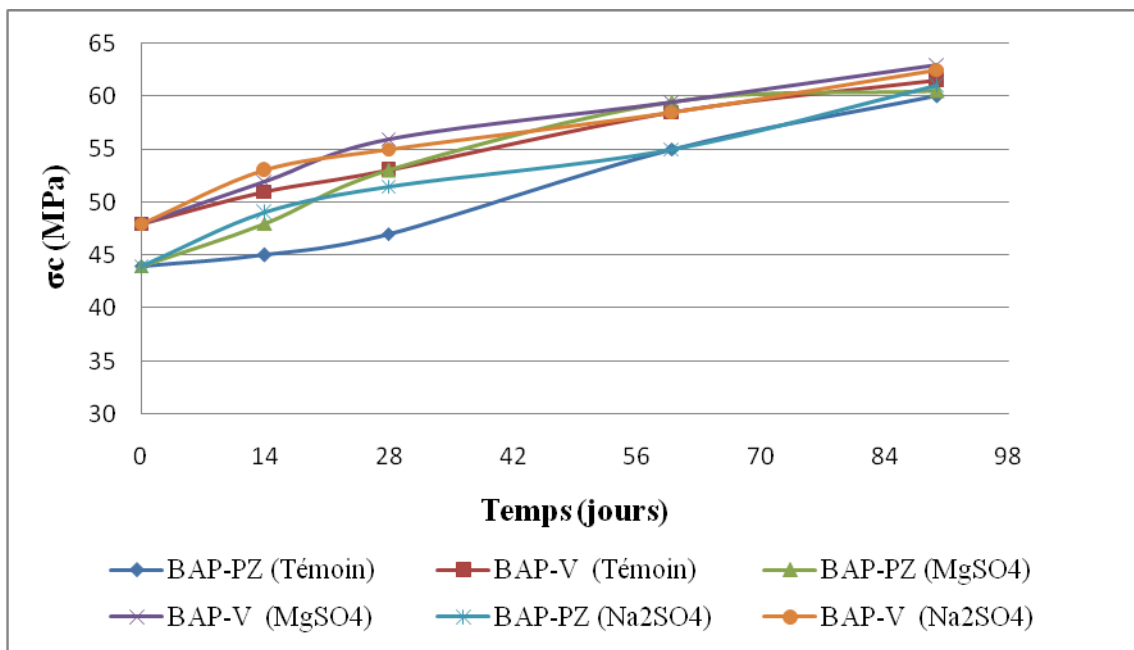


Figure III.14: évolution des résistances à la compression des deux BAP immergés dans les deux solutions sulfatiques et l'eau douce.

On remarque que la résistance à la compression évolue positivement durant la période d'immersion, et on peut distinguer deux fuseaux l'un des BAP-PZ et l'autre des BAP-V où ce dernier présente une légère supériorité par rapport au premier.

Les bétons immergés dans les solutions sulfatiques présentent une évolution des résistances à la compression plus importante que celle des bétons immergés dans l'eau douce et ce au 60^{ème} jour d'immersion, après cet âge on constate une convergence des valeurs de résistances.

Pour mieux apprécier l'évolution de ces résistances, une comparaison entre les valeurs de résistances des deux BAP dans les solutions sulfatiques et celles des dans le milieu témoin a été faite et les résultats obtenus sont représentés sous forme d'histogramme dans la figure III.15:

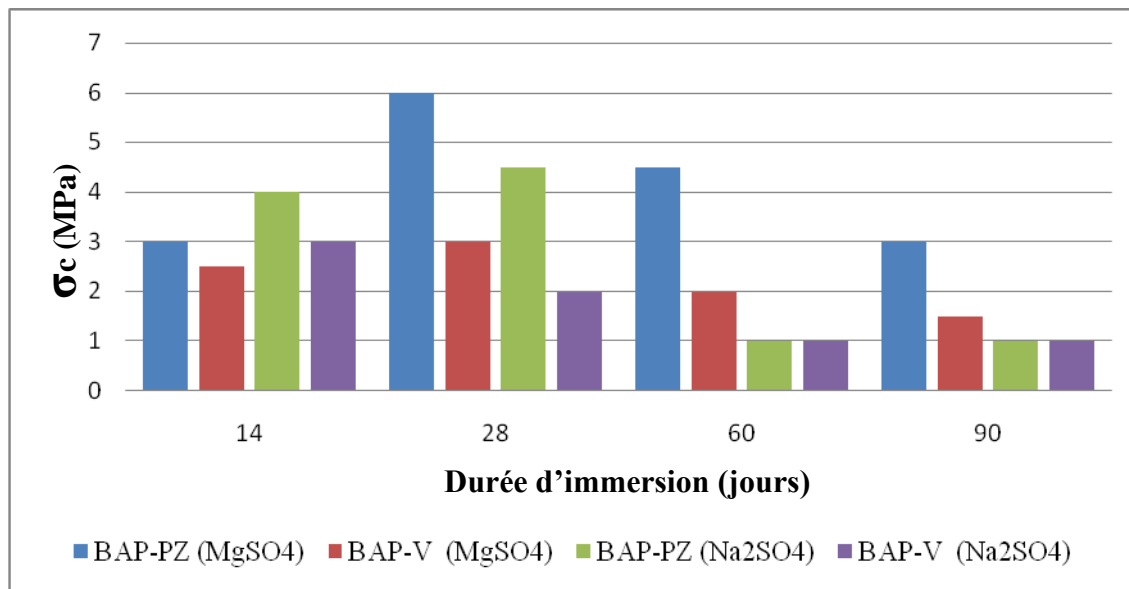


Figure III.15: évolution des résistances à la compression des deux BAP dans les solutions sulfatiques par rapport à celles dans l'eau douce

On constate pour les échéances de 14 et 28 jours des résistances nettement supérieures par rapport au milieu témoin et la cause la plus probable serait la formation de l'ettringite et du gypse qui remplissent les micropores menant à une structure dense. Plusieurs recherches indiquent qu'au delà d'un certain âge la formation de ces produits expansifs cause la destruction de la pâte de ciment durcie et sa fissuration ce qui influe négativement sur les caractéristiques mécaniques des mortiers et bétons [76], [77], [78], [79].

Après 28 jours une diminution progressive des écarts entre résistances en milieux agressifs et milieu témoin est constatée, et cela n'est pas dû à une chute des résistances dans les milieux sulfatiques mais à leur stabilisation dans ces derniers et à leur augmentation dans le milieu témoin ce qui est en accord avec les résultats de plusieurs recherches de la littérature sur l'effet positif des additions pouzzolaniques sur la résistance des mortiers et des bétons vis-à-vis des attaques par les sulfates [76], [77], [78], [79].

Selon ces auteurs, la bonne résistance des mortiers et des bétons pouzzolaniques peut être attribuée à la consommation de la portlandite par la réaction pouzzolanique, ce qui réduit le potentiel de formation du gypse et de l'ettringite secondaire. En plus, la réaction pouzzola-

nique engendre la formation des gels secondaires C-S-H qui forment une enveloppe sur les aluminates et d'autres phases réactives, ce qui gêne la formation de l'ettringite.

Par ailleurs ces C-S-H engendrent la densification de la zone de transition pâte-granulat ce qui limite la diffusion des ions SO_4^{-2} . En effet, dans ce type d'essai par immersion, la diffusion est le mécanisme principal de pénétration des ions agressifs [76].

III.2.2.g L'examen visuel

L'examen visuel des BAP en contact avec les sulfates, est un moyen pour évaluer les dégradations de l'aspect extérieur des éprouvettes.

Les solutions sulfatiques laissent la surface d'aspect beaucoup moins dégradé que d'autres substances agressives telles que les acides [56]. D'après la littérature, les gypses formés sont sous formes d'aiguilles sortant de surface [56].

L'inspection visuelle après 90 jours d'immersion des spécimens de BAP dans la solution MgSO_4 (figure III.16), nous révèle la formation d'une couche blanchâtre sur la surface extérieure des échantillons (gypse). En comparaison à celle des spécimens conservés en solution de Na_2SO_4 , aucune dégradation et fissuration n'ont été observées au niveau des facettes des éprouvettes.



Figure III.16: Etats des surfaces des éprouvettes des BAP immergées dans différents milieux.

Na_2SO_4 , MgSO_4

III.3 CARBONATATION ACCÉLERÉE

La carbonatation est un phénomène naturel de dissolution du dioxyde de carbone de l'air dans la solution interstitielle des bétons suivi d'une réaction acide-base avec les composés basiques à savoir les hydrates renfermés dans la matrice cimentaire (portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, et silicates de calcium hydratés C-S-H) pour former principalement des carbonates de calcium (ou calcite CaCO_3) et il en résulte une diminution du pH.

La diminution du pH ainsi engendrée peut conduire, dans des conditions idéales de température et d'humidité, à la dépassivation de la couche protectrice des armatures et donc à la corrosion des armatures en acier.

Pour mesurer la profondeur de carbonatation, la pulvérisation d'un indicateur coloré tel que la phénolphthaléine permet de visualiser les zones carbonatées sur des surfaces fendues de béton: la phénolphthaléine est incolore sur les zones carbonatées et rose sur les zones saines, elle vire pour un pH d'environ 9.

Dans l'atmosphère, la carbonatation est très lente et pour mieux évaluer ses conséquences à long terme, des essais accélérés sont réalisés en laboratoire (voir partie II).

Chacune des deux formulations étudiées a été soumise à un essai de carbonatation accélérée. Trois autres échantillons issus de chacune des deux formulations ont été conservés à l'air libre du laboratoire afin de mesurer la carbonatation naturelle et les exploités en tant que témoins.

La figure III.17 représente des photos des deux BAP prises à 28 jours après l'exposition des éprouvettes de ces derniers dans le CO_2 :

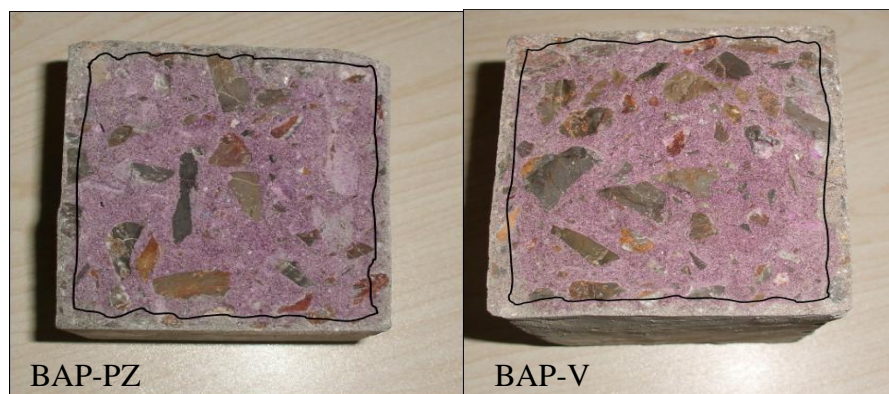


Figure III.17: Fronts de carbonatation visualisés par pulvérisation à la phénolphthaléine

L'évolution des profondeurs de carbonatation en fonction du temps d'exposition est représentée sur la figure III.18 :

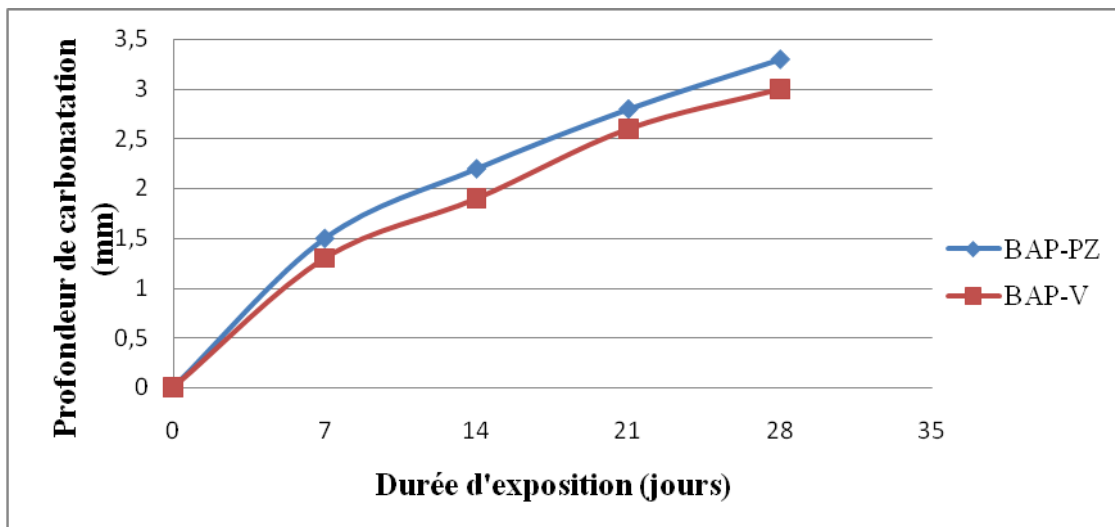


Figure III.18 : Profondeur de carbonatation en fonction du temps d'exposition au CO₂ (50% volumique).

A partir des courbes de la figure III.18 on constate que les valeurs des profondeurs carbonatées pour les deux BAP sont comprises entre 0 et 3 mm à 28 jours ce qui est signe de bonne résistivité de ces deux BAP vis-à-vis de la carbonatation. On note que les deux BAP possèdent des rapports E/C égal à 0.50, cela agit positivement sur la profondeur carbonatée.

En effet, plus ce rapport est élevé et plus la quantité d'eau libre susceptible d'être évaporée est grande. Cette eau en partant laisse des vides qui favorisent, d'une part, le mouvement de l'eau libre située plus profondément dans le matériau et, d'autre part, la pénétration et la diffusion du gaz carbonique. Donc les dosages en liants élevés (plus de 400 kg/m³) tendent aussi à freiner la vitesse de pénétration du gaz carbonique puisque ils réduisent le rapport $E/L_{\text{équi}}$ [56]. Les données de la littérature montrent des avis contradictoires sur l'effet des additions pouzzolaniques sur le comportement des BAP vis-à-vis de la carbonatation, où plusieurs recherches sur la carbonatation des mortiers et des bétons ([82], [80], [83]), rapportent l'effet négatif de la substitution du ciment par la cendre volante. Selon ces recherches, la consommation d'une partie de portlandite par réaction pouzzolanique augmente la profondeur de la carbonatation.

D'autres recherches telles que celle de Siad [56], rapportent l'effet positif des additions pouzzolaniques tels que la cendre volante et la pouzzolane naturelle et qui peut être dû à la grande densification de la structure poreuse en présence des additions pouzzolaniques qui rend l'effet de la consommation de la portlandite un effet secondaire.

En outre, nous pouvons expliquer cela, par l'hypothèse de Rozière [81], qui montre que les additions interviennent sur la carbonatation par la dilution de la chaux du clinker et des additions, et non pas par consommation de la portlandite par réaction pouzzolanique.

Cela semble justifier le petit écart constaté sur la cinétique de carbonatation du BAP-V qui est sensiblement plus faible que celle du BAP-PZ.

En effet, les pourcentages du CaO dans la pouzzolane naturelle de Béni-Saf est proche de 9%, et proche de 18% pour la vase calcinée du barrage Chorfa II. Ces pourcentages ajoutés à la chaux du ciment CPA CEMI 42.5 qui est de l'ordre de (64%), pourrait ralentir la carbonatation en générale dans les deux BAP et faire la différence entre BAP-V et BAP-PZ.

En ce qui concerne les échantillons conservés à l'air libre afin de mesurer la carbonatation naturelle, nous n'avons pas pu avoir des résultats observables ni mesurables à cause de la courte durée de conservation. En effet l'essai de carbonatation naturelle nécessite une durée de 12 mois en moyenne pour avoir des résultats probants.

III.4. CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre a été de comparer l'effet de l'incorporation de la vase calcinée du barrage Chorfa II par rapport à celui de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, sur la résistance du BAP vis-à-vis des attaques sulfatiques Na_2SO_4 et MgSO_4 et de la carbonatation accélérée.

Les principales conclusions que nous pouvons tirer, sont les suivantes :

- Dans les milieux ; témoin et sulfatique ; le BAP-V présente des gains en masse sensiblement plus importants que ceux du BAP-PZ.
- Les bétons immergés dans les solutions sulfatiques ont un gain de masse supérieur à celui des bétons conservés dans la solution témoin (eau douce).
- Par comparaison entre les milieux témoin et sulfatiques, nous avons enregistré une expansion caractéristique dues aux attaques sulfatiques. Les deux formulations présentent en général des comportements similaires avec quelques particularités nécessitant plus de résultats à des échéances plus avancées que les nôtres.

- Les deux formulations présentent une augmentation continue de la résistance à la compression, ce qui signifie que les attaques sulfatiques n'ont pas eu beaucoup d'influence sur la résistance mécanique de ces bétons dans la période de 90 jours.
- L'incorporation de la vase dans la pâte des BAP réduit sensiblement le risque de carbonatation de ces bétons par rapport à celui des BAP à base de pouzzolane naturelle.

Conclusion générale et perspectives

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les travaux de notre étude ont été menés dans le but d'atteindre deux principaux objectifs, le premier concerne la mise en évidence de la valorisation de la vase du barrage Chorfa II de la région de Sig (ouest Algérien), et qui est un matériau nécessitant peu d'énergie dans son exploitation, comme substitut minéral partiel au ciment rentrant dans la composition des BAP, et le deuxième objectif est de donner une réponse fondée sur l'influence de ce type de substitut minéral sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des BAP en se référant aux propriétés offertes par la pouzzolane naturelle de la région de Béni-saf sur le même type de béton comme témoin.

Pour répondre à cela, nous avons commencé par la caractérisation des différents matériaux utilisés dans les compositions des bétons d'études. Nous avons adopté une formulation qui couvre deux types de BAP de même classe de résistance: un BAP à base de pouzzolane naturelle (BAP-PZ) et un BAP à base de vase calcinée du barrage de Chorfa II (BAP-V), incorporant respectivement 20% de pouzzolane naturelle et 20% de vase calcinée substituées partiellement au volume du ciment. Les bétons ont été formulés à partir des mêmes constituants, avec le même squelette granulaire et un rapport E/Li identique.

Les principales conclusions auxquelles nous sommes parvenues sont :

A l'état frais, toutes les formulations du BAP ont été caractérisées à l'aide d'essais spécifiques permettant de les définir comme des BAP ayant une ouvrabilité optimale, une bonne capacité de remplissage et une absence de ségrégation.

L'introduction de la vase dans le BAP a conduit à l'augmentation du dosage en superplastifiant.

La présence de la vase contribue à l'avancement du temps de début et fin de prise en absence d'adjuvant, mais cette propriété s'inverse en présence d'un fort dosage en superplastifiant qui jouera en tant que retardateur de prise.

A l'état durci, les premiers résultats expérimentaux ont montré que les valeurs des résistances en compression à 28 jours sont très proches avec une légère supériorité pour le BAP-V, mais elles convergent pratiquement après l'âge de 60 jours.

En ce qui concerne la résistance à la traction par flexion, les valeurs obtenues ont été très proches. Ce qui signifie que l'effet du type de substitut minéral utilisé dans les BAP est négligeable pour cette propriété.

A travers les résultats des essais de durabilité, nous avons constaté des performances très comparables, voire meilleures de la vase calcinée face à la pouzzolane naturelle sur la résistance des BAP vis-à-vis des attaques sulfatiques et de la carbonatation.

Les résultats montrent que la vase calcinée du barrage Chorfa II influe considérablement et positivement sur les propriétés des bétons autoplaçants (BAP) ainsi que leur résistance dans les milieux contenant des sulfates et du gaz CO₂. Les résultats montrent également d'une façon générale des comportements très proches entre la vase et la pouzzolane naturelle.

La possibilité de valoriser la vase du barrage Chorfa II (activée thermiquement afin de transformer les structures minérales qui sont à l'état naturel stables, en structures amorphes) dans le but d'en fabriquer un substitut aux liants hydrauliques d'usage courant semble réalisable.

Vu les résultats de cette étude, de nouveaux paramètres pourront faire suite à ce travail en envisageant de faire substituer une partie de ciment par la vase calcinée et d'étudier le pourcentage optimal et/ou maximal de substitution ainsi que leur influence sur les paramètres physico-mécaniques tels que les modules d'élasticité statique et dynamique, et de durabilité des BAP par des essais de porosité accessible à l'eau et de porosité au mercure .

Enfin, une étude plus approfondie a long terme des caractéristiques microscopiques et de durabilité des BAP peut être envisageable dans la mesure où des comportements vis-à-vis de la carbonatation ou les attaques des sulfates nécessitent un suivi permanent de la composition minéralogique avant et après la conservation dans les milieux agressifs et ce par des analyses au microscope électronique à balayage (MEB) et des analyses minéralogiques par diffraction des rayons X (DRX).

Ainsi, nous jugeons utile d'entreprendre des travaux de recherche qui permettront d'exploiter à l'échelle industrielle la vase du barrage de Chorfa II.

Références bibliographiques

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **AFGC 2008.** « Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants », (janvier 2008).
- [2] **OKAMURA H.** «Self-compacting concrete. Development, present and future», Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suede, pp. 3-14, 13-15 September 1999.
- [3] **AFGC 2002.** «Interim recommendations for use of Self-Compacting Concrete», Association Française de Génie Civil, 2002. Association
- [4] **AFGC** « Recommandations provisoires », document scientifique et technique (juillet 2000)
- [5] **SEDRAN T.** «Les Bétons Autonivelants», bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-Avril 1995.
- [6] **TURCRY P.** Thèse de doctorat en Génie Civil, « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants –Influence de la formulation », Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, le 3 février 2004.
- [7] **ADAM N. VILLE,** « Propriétés des bétons », traduit par le CRIB (Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, SHERBROOKE-LAVAL), septembre 2000.
- [8] **BOUHAMOU N.** Thèse de Doctorat, « influence des rapports eau/ciment et fines/ciment sur le comportement a l'état frais et durci du béton autoplaçant a base de matériaux locaux Algériens». Université de Mostaganem, Algérie. (2008)
- [9] **EFNARC,** Specifications and guidelines for self-compacting concrete, fevrier 2002.
- [10] **JOSSERAND L.** Thèse de doctorat en Structures et Matériau, «Ressuage des bétons hydrauliques », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, le 11 octobre 2002.
- [11] **YURIGI, SAKATA N, IWAI M, SAKAI G.** (1993), «Mix design for highly workable concrete », Conference concrete 2000, Dundee, 7-9 September, p11.
- [12] **NF EN 934-2,** Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 2 : Adjuvants pour bétons – Définitions, spécifications et critères de conformité.
- [13] **GCI – 714** « Cours : Durabilité et Réparations du Béton », Université de Sherbrooke, CANADA, Juillet 2009.
- [14] **CASTEL .A, AL-MAHMOUD.F,** «Caractérisation de la capacité d'entraînement et d'ancrage des armatures par les BAP», rapport PNB@P Opération du réseau génie civil & urbain –IREX, Toulouse, France, 2004.

- [15] **AÏTCIN et AL.**, « L'interaction ciment / superplastifiant. Cas des polysulfonates », Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, Juillet-Août 2001, n° 233, pp 87-98.
- [16] **BETHMONT S.**, « Mécanismes de ségrégation dans les BAP ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 2005.
- [17] **MATSUOKA S.**, «Development of combinaison type Self-Compacting Concrete and Evaluation Test Methods», Journal of Advanced Concrete technology, 2003.
- [18] **BILLBERG P.**, «Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration», Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, October 2001.
- [19] **HAYAKAWA M., MATSUOKA Y. and YOKOTA K.**, «Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan», Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, 1995.
- [20] **PETERSSON Ö, BILLBERG P. and VAN B.K.**, «A model for Self-Compacting Concrete», International Rilem Conference on 'Production methods and workability of concrete', RILEM Proceedings 32, 1996.
- [21] **OKAMURA et OUCHI**, «Self-compacting concrete», Journal of advanced Concrete Technology, 2003
- [22] **SEDRAN**, «Rhéologie et Rhéométrie des bétons: application aux bétons autonivelants», 1999, thèse de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées.
- [23] **EDAMATSU, NISHIDA et OUCHI**, «A rational mix-design method for self-Compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles», Proceedings of the 1st international RILEM Symposium.
- [24] **VAN BUI et MONTGOMERY**, «Mixture proportioning method for self-compacting High Performance concrete with minimum paste volume», Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, 1999.
- [25] **DE LARRARD**, «Structures granulaires et formulation des bétons», Etudes et Recherches Des Laboratoires des Ponts et Chaussées.
- [26] **Abdellah El Hilali**, « Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) : influence des fillers calcaires et des fibres végétales », Université de Cergy-pontoise 2009.
- [27] **DE LARRARD F. et LE ROY R.**, « Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances », Matériaux et Constructions.
- [28] **LE ROY R, DE LARRARD F, et PONS G.**, « Calcul des déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances », Extension du domaine d'application des règlements de calcul BAEL/BPEL aux bétons à 80 MPa, Bulletin des LCPC, spécial XIX, mai 1996.

- [29] **DE LARRARD F.**, «Concrete mixture-proportioning - A scientific approach», Modern Concrete Technology Series, N°9, E&FN SPON, 1999.
- [30] **PERA J., HUSSON S. and GUILHOT B.**, «Influence of finely ground limestone on cement hydration», Cement and Concrete Composites, 1999.
- [31] **GIBBS J.C. and ZHU W.**, «Strength of hardened self-compacting concrete», Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, septembre 1999.
- [32] **SONEBI M. and BARTOS P.J.M.**, «Hardened SCC and its bond with reinforcement», Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, Septembre 1999.
- [33] **PETERSSON Ö.** «Limestone powder as filler in self-compacting concrete – Frost resistance and compressive strength», Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, octobre 2001.
- [34] **FELEKOGLU B., YARDIMCI M. Y. and BARADAN B.**, «A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete», Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, août 2003.
- [35] **SHI C., WU Y., SHAO Y. and RIEFLER M.**, «Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete», First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, novembre 2002.
- [36] **PONS G., PROUST E. and ASSIE S.**, «Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete», Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, août 2003.
- [37] **KLUG Y. and HOLSCHEMACHER K.**, «Material properties of hardened self-compacting concrete», ICPCM – A new era of building, Le Caire, Egypte, février 2003.
- [38] **BARCELO L., BOIVIN S., ACKER P., TOUPIN J. and CLAVAUD B.**, «Early age shrinkage of concrete: back to physical mechanisms», Concrete Science and Engineering, Vol 03, juin 2001.
- [39] **GRAM H. - E., PIIPARINEN P.**, «Properties of SCC – Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance», Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, septembre 99
- [40] **TURCRY P.**, «Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation», thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2004.
- [41] **HU C. et BARBIERI B.**, «Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel», Science des matériaux et propriétés des bétons, pp.265-272, 1^{ère} Rencontre Internationale, Toulouse, 5-6 mars 1998.

- [42] **PERSSON B.**, «Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete», Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, 13-15 septembre 1999.
- [43] **SAKATA K.**, «Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete», CONSEC 98, International Conference 2, Tronso, GB, 1998.
- [44] **NEVILLE A. M.**, «Propriétés des Bétons», traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles 2000.
- [45] **VAN B. K. and MONTGOMERY D.**, «Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone», Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, septembre 1999.
- [46] **HASNI L.**, « Bétons Autoplaçants », Rapport de recherche n°98-004/98-006 du CEBTP présenté aux journées du PN BAP, juillet 1999.
- [47] **PROUST E.**, « Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés », thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2002.
- [48] **BAEL 99**, « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites », fascicule n°62 – Titre 1^{er} – Section I, BAEL 91 révisé 99, avril 1999.
- [49] **CEB-FIP Model Code 1990**, Design Code, Euro-international Concrete Committee, Lausanne, 1993.
- [50] **VIEIRA M. and BETTENCOURT A.**, «Deformability of hardened SCC», Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 17-20 août 2003.
- [51] **PERSSON B.**, «A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete», Cement and Concrete Research, 31, 2000.
- [52] **ACKER P.**, « Sur les origines du retrait et du fluage du béton », Revue française de génie civil, volume 7, 2003.
- [53] **GUILLOIN E.**, « Durabilité des matériaux cimentaires –modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles». Thèse de doctorat, d'école normale supérieure de Cachan, France 2004.
- [54] **R.GANE**, "Cours de durabilité et réparation des bétons (GCI-714)", Chapitre2: La durabilité des bétons. Université de Sherbrooke, Canada, 2002,p.32,www.usherb.ca.

- [55] **TAGNIT-HAMOU.A. , PETROV.N.**, «Durability of Concrete in a Very Aggressive Environment», Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Cement Microscopy, Montréal, Québec, Canada, 29 avril au 4 mai, pp 420-430, 2000.
- [56] **SIAD HOCINE**, «La durabilité des bétons autoplaçants à base des additions pouzzolamiques et fillers calcaires», Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2010.
- [57] **J. BARON, J. P. OLLIVIER**, «Les bétons bases et données pour leur formulation». Edition Eyrolles. Deuxième tirage, 1997.
- [58] **Z.GUEMMADI, G.ESCADECUAS, B.TOUMI, H.HOUARI, P.CIASTRES**, «Influence des fillers calcaires sur les performances mécaniques des pâtes de ciment ». 1er Congrès international sur la technologie et la durabilité du béton, U.S.T.H.B Alger- Algérie, pp 1-8, 24-26 Mai 2004.
- [59] **KHAYAT K.H (1998)**, «Use of viscosity-modifying admixture to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete», ACI Material journal, vol.95 N°2.
- [60] **R.DUPAIN, R. LANCHON ET J.C. SAINT ARROMAN**, « Granulat, Sols, Ciments et Bétons», caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, 2ème édition conforme aux normes européennes, édition Educative, 1995, pp 235.
- [61] **RENAUD.H.**, « Constructeur bâtiment technologique » tome1. Les éditions foucher, Paris 1982.
- [62] **LARGENT.R.**, «Estimation de l'activité pouzzolanique – recherche d'un essai». Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées -93-janv-févr. 1978 -Réf. 2143. PP.61
- [63] **SEMCHA Abdélaziz.**, «Valorisation des sédiments de dragage: Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug». Thèse de doctorat a l'Université de Reims Champagne-Ardenne . Génie Civil. Décembre 2006.
- [64] **M. SAMARA, E. ROZIERE, M.I.A. KHOKHAR, A. LOUKILI, F.SKOCZYLAS.**, «Valorisation des sédiments traités dans les bétons autoplaçants», XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Nancy, 4 au 6 juin 2008.
- [65] **FOUCAULT A., RAOULT J.F.** « Dictionnaire de géologie ». Editions Masson, Paris, 1980. ISBN 2-25-654661-1.
- [66] **SHNEIDER G.** «Le curage des sédiments des cours d'eau ». Le courrier de l'environnement de l'INRA, 2001, vol. 43, pp. 146-147.
- [67] **BERTREAU I., MARTIN S., VASSILIADIS A.** « Le curage des cours d'eau lorsque les sédiments contiennent des éléments-traces toxiques ». Le courrier de l'environnement de l'INRA, 1993, vol. 20, pp. 27-35.

- [68] **Agence de l'eau** (1). « Méthode de gestion et de réutilisation des sédiments pollués » - Inventaire détaillé des techniques de curage, transport, traitement et usage des sédiments . [En ligne], 2002, 126 p. Disponible sur : <http://www.eau-artoispicardie.fr/>.
- [69] **Chikouche Mohamed Aziz**, «Effet des ajouts a base d'argiles gréseuses et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaires» Thèse Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister spécialité : Génie Civil Option : Matériaux, université de M'SILA, 2008.
- [70] **G.LUCAS, P.CROS, J.LANG**, « Les roches sédimentaires, étude microscopique des roches meubles et consolidées », Tome 2, édition DOIN, 1976, P 38.
- [71] **N.S.SORO**, « Influence des ions fer sur les transformations thermiques de la kaolinite », Thèse pour l'obtention d'un grade de docteur, spécialité sciences des matériaux céramiques et traitements de surfaces, université de Limoges, 2003, P 16-19, 34.
- [72] **Pierre-Yves SCORDIA**, «Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers», Thèse présentée pour l'obtention du grade de docteur, l'école centrale de LILLE, Spécialité : Génie Civil, 2008. P 7-23.
- [73] **BOUCARD L.** « Valorisation de sédiments fluviaux stabilisés». Thèse de l'Université de Lille, 2006, 206 p.
- [74] **BONNET C.** «Développement de bio-essais sur sédiments et applications de l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés». Thèse de l'Université de Metz, 2000.
- [75] **Ghrici, M., Kenai, S., Said-Mansour, M. et Kadri, E.**, « Some engineering properties of concrete containing natural pozzolana and silica fume». *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 5(2) : 349-354, 2006.
- [76] **Mangat P.S., Khatib J.**, «Influence of flay ash , silica fume and slag on sulphate resistance of concrete », *ACI Materials Journal – Vol 92* , pp 587 – 594 -1995.
- [77] **Tikalsky P.J., Carrasquillo R.L.**, «Influence of fly ash on the sulphate resistance of concrete», *ACI Struct J* 89 (1992) 69-75, 2000.
- [78] **Torii K., Taniguchi K., Kawamura M.**, «Sulfate resistance of high fly ash content concrete», *Cement and Concrete Research* 25 (4) (1995), pp. 759±768.
- [79] **Neville A.**, «The confused world of sulfate attack on concrete, Review», *Cement and Concrete Research* 34, 1275-1296, 2004.
- [80] **Khunthongkeaw, J., Tangtermsirikul S. and Leelawat, T.**, «A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete», *Construction and Building Materials*, Vol. 20, No. 9, pp. 744-753, 2006.

- [81] **Roziere E.**, « Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle », Thèse de doctorat, l'Ecole Centrale de Nantes, 2007.
- [82] **Sulapha P., Wong S.F., Wee T.H., Swaddiwudhipong S.**, «Carbonation of concrete containing mineral admixtures». J Mater Civil Eng 2003; 134–43.
- [83] **Sisomphon K., Franke L.**, «Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials», Cement and Concrete Research, (2007), pp. 1647–1653.