

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



N° d'ordre :/2015

THESE EN COTUTELLE

**POUR OBTENIR LE DIPLOME DE DOCTEUR EN SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE
MOSTAGANEM ET DE L'UNIVERSITE CERGY-PONTOISE
SPECIALITE : GENIE CIVIL**

Présentée par :

BELARIBI Omar

**« DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS À BASE
DE VASE ET DE POZZOLANE »**

Devant le jury composé de :

Mr K. BENDANI	Professeur, Université de Mostaganem	Président
Mme N. BELAS	Professeur, Université de Mostaganem	Directrice de thèse
Mme S. AGGOUN	MCF-HDR, Univ. Cergy-Pontoise	Co-Directrice de thèse
Mr A. BENANANE	Professeur, Université de Mostaganem	Examineur
Mr A. BENAÏSSA	Professeur, UST-MB Oran	Examineur
Mr N. ABRIAK	Professeur, Ecole des Mines de Douai	Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2014-2015

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 :

Aux membres du jury : Mr BENDANI Karim d'avoir présidé ma soutenance. Un grand merci à Mr BENANANE Abdelkader Professeur à l'université de Mostaganem, Mr BENAÏSSA Abdelatif, Professeur à l'Université USTO-MB d'Oran et Mr ABRIAK, Professeur à Ecole des Mines de Douai, d'avoir accepté la lourde tâche d'examiner ce travail.

J'adresse ma profonde gratitude à Mme BELAS Nadia, professeur à l'université de Mostaganem qui a dirigée ce travail de recherche et qui m'a permis de mener à bon terme cette thèse. Merci Mme BELAS Nadia.

Mes remerciements vont aussi mon Co-directeur, Mme AGGOUN Salima Maître de conférences HDR, de l'Université de Cergy-Pontoise, pour ses nombreux conseils, qui ont contribué au bon déroulement des travaux de cette thèse.

J'exprime ensuite toute ma sympathie à tous les personnels techniques et administratifs de l'Univ de Mostaganem et de l'UST d'Oran qui ont pu m'assister durant mes travaux de cette thèse.

Je terminerai en remerciant toute ma famille et en particulier mes parents qui m'ont soutenu durant mes études et qui m'ont toujours encouragé. Leur générosité est inestimable. Qu'ils trouvent ici le témoignage de mon affection

Merci

SOMMAIRE

LISTE DE FIGURES

LISTE DE TABLEAUX

ملخص

RESUME

ABSTRACT

INTRODUCTION GENERALE	1
PARTIE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES BETONS AUTOPLAÇANTS	3
<i>I.1 INTRODUCTION</i>	3
<i>I.2. NOTION DU BETON AUTOPLAÇANT</i>	3
<i>I.3 CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT RAIS</i>	5
<i>I.3.1 Essai d'étalement (Slump flow)</i>	5
<i>I.3.2 Essai V funnel</i>	6
<i>I.3.3 Essai de la boîte en L</i>	7
<i>I.3.4 Essai J-Ring</i>	8
<i>I.3.5 Essai de stabilité au tamis</i>	9
<i>I.3.6 Essai de ressuage</i>	10
<i>I.4 FORMULATION DES BAP</i>	6
<i>I.4.1 Volume de gravillon</i>	11
<i>I.4.2 L'emploi de superplastifiants</i>	11
<i>I.4.3 Une quantité d'addition ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante</i>	13
<i>I.4.4 Influence des additions minérales sur les propriétés des BAP</i>	16
<i>I.1.5 CONCLUSION</i>	23
CHAPITRE 2 : LA DURABILITE DES BETONS	25
<i>I.1 INTRODUCTION</i>	25
<i>I.2. FACTEURS INFLUENÇANT LA DURABILITE</i>	25
<i>I.3. LES ATTAQUES CHIMIQUES DES BETONS</i>	27
<i>I.3.1. Actions des acides</i>	27
<i>I.3.2. Actions des sulfates</i>	31
<i>I.3.3. La carbonatation</i>	37
<i>I.4 CONCLUSION</i>	41
CHAPITRE 3 : LA VALORISATION DE LA VASE ET LA POUZZOLANE DANS LES BETONS AUTOPLAÇANTS	43
<i>I.1. INTRODUCTION</i>	43
<i>I.2. PHENOMENE DE L'ENVASEMENT</i>	43
<i>I.2.1. Envasement en quelques chiffres</i>	44
<i>I.2.2. Présentation du barrage de Fergoug</i>	47
<i>I.2.3. Présentation du barrage de Chorfa</i>	50
<i>I.3. LES SEDIMENTS DE DRAGAGE (VASE)</i>	52
<i>I.3.1. Définition et origine</i>	52
<i>I.3.2. Constitution des sédiments</i>	52
<i>I.3.3. Le dragage des sédiments</i>	53
<i>I.3.4. La valorisation des sédiments de dragage</i>	54
<i>I.4. LES POUZZOLANES</i>	56

1.4.1. Définition	56
1.4.2. La pouzzolane naturelle de Béni-Saf	57
1.4.3. Etudes relatives à la Pouzzolane Naturelle de Béni-saf	58
1.5. CONCLUSION	58
PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	59
PARTIE II : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES	
CHAPITRE 1 : MATERIAUX	63
II.1. INTRODUCTION	63
II.2. IDENTIFICATION DES MATERIAUX	63
II.2.1. Le Ciment	63
II.2.2. Les Granulats	64
II. 2.3. Les Additions	65
II. 2.4. Les Adjuvants	69
II.3. CONCLUSION	70
CHAPITRE 2 : METHODES EXPERIMENTALES	71
II.1. INTRODUCTION	71
II.2. ESSAIS SUR PATE NORMALISEES	73
II.2.1. Essais de consistance	73
II.2.2. Essais de prise	73
II.3. ESSAIS SUR MORTIERS	73
II.3.1. Formulation des Mortiers	73
II.3.2. Maniabilité des mortiers	74
II.3.3. Essai de chaleurs d'hydratation	74
II.3.4. Essais Mécaniques	76
II.4. ESSAIS DE CARACTERISATION DES BAP	77
II.4.1. Elaboration des BAP	78
II.4.2. Essais de caractérisation à l'état frais	79
II.4.3. Essais de caractérisation à l'état durci	84
II.4.4. Essais de durabilité	85
II.5. CONCLUSION	91
PARTIE III : ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS	
CHAPITRE 1 : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT FRAIS	92
III.1. INTRODUCTION	92
III.2. PRISE DES PATES A BASE DES AJOUTS MINERAUX	92
III.3. LA MANIABILITE DES MORTIERS	95
III.4. CARACTERISATIONS DES BAP FRAIS	96
III.5. CONCLUSION	100
CHAPITRE 2 : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT DURCI	101
III.1. INTRODUCTION	101
III.4. RESULTATS EN TERMES DE CHALEUR D'HYDRATATION	101
III.2.1 Quantité de chaleur	101
III.2.2 Taux de flux de chaleur des mortiers	103

III.3. RESISTANCES A LA COMPRESSION DES MORTIERS.....	105
III.4 CARACTERISATION DES BAP DURCI	109
III.4.1. Contrôle de ségrégation	109
III.4.2. Evolution des résistances mécaniques en compression	110
III.5. CONCLUSION.....	112
 CHAPITRE 3 : RESULTATS DE L'ETUDE DE DURABILITE	 113
III.1. INTRODUCTION.....	113
III.2 LA RESISTANCE AUX ATTAQUES SULFATIQUES EXTERNES	113
III.2.1. Variation de la masse dans la solution témoin	114
III.2.2. Résultats de l'attaque par le sulfate de sodium Na_2SO_4	115
III.2.3. Résultats de l'attaque par le sulfate de Magnesium $MgSO_4$	119
III.3. LA RESISTANCE AUX ATTAQUES ACIDES (HCL ET H_2SO_4)	124
III.3.1. Résultats de l'attaque par l'acide H_2SO_4	125
III.3.2. Résultats de l'attaque par l'acide chlorhydrique HCl	128
III.4. CARBONATATIONS ACCELEREE ET NATURELLE.....	131
III.4.1. Carbonatation accélérée.....	131
III.4.2. Carbonatation naturelle	133
III.5. CONCLUSION	135
 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	 128
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	140
ANNEXES.....	

Liste de figures

Figures Partie I

Figure I.1: Essai d'étalement au cône (slump flow).....	6
Figure I.2. L'essai V-funnel.....	6
Figure I.3: Essai de la boîte en L	7
Figure I.4: Essai J. Ring.....	8
Figure I.5: Essai de stabilité au tamis 9	
Figure I.6: Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment	12
Figure I. 1: Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton....	12
Figure I.8 : Spectres d'analyse thermique (ATG/ATD) de la kaolinite	16
 Figure I. 9 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP à base d'addition filler calcaire et d'un BOV correspondant	 17
Figure I. 10: Résistance mécanique d'un BOV et de 2 BAP à base de filler calcaire	18
Figure I.11: Courbes de calorimétrie des différents mélanges -Chaleur d'hydratation.....	20
Figure I.12 : Courbes de calorimétrie -Elévation de la température	21
Figure I.13: Etalements des bétons autoplaçants	22
Figure I.14 : Evolution des écarts de résistances en compression des BAP entres 7 jours et les autres échéances en fonction du temps	23
Figure I. 15 : Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans l'acide sulfurique	30
Figure I.16 : Cinétique de dégradation des pâtes en immersion dans l'acide citrique	30
 Figure I.17. Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de sodium.....	 33
Figure I.18 : Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de magnésium.....	34
Figure I.19: variation de la masse des échantillons immergés dans la solution du sulfate de sodium (bétons de classe 50 MPa)	35

Figure I.20 : Expansions linéaires mesurées sur des éprouvettes de bétons d'ouvrages d'art (BOA) avec ou sans métakaolin flash.....	36
Figure I.21. Mécanisme de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	38
Figure I.22: Profondeur de carbonatation après 9 mois	39
Figure I.23 : Evolutions des profondeurs de carbonatation accélérée au cours du temps	41
Figure I.24: Le taux de comblement par rapport à la capacité totale des barrages Algériens.....	46
Figure I.25: L'envasement annuel de quelques barrages Algériens.....	46
Figure I.26 : Situation géographique du barrage de Fergoug	47
Figure I.27 : Le barrage du Fergoug, ses ouvrages annexes et ses affluents	48
Figure I.28: Vue du barrage de Fergoug (2012).....	49
Figure I.29: La digue et la cuvette envasée du barrage de Fergoug (2012).....	49
Figure I.30 : Situation géographique de la ville de Mascara et du barrage des Chorfa.....	50
Figure I.31 : Vue générale du barrage de Chorfa.....	51
Figure I.32 : Vue du coté interne de la digue du barrage Chorfa	51
Figure I.33 : Vue du coté interne de la digue du barrage Chorfa	51
Figure I.34 : Engin mécanique de dragage	53
Figure I.35 : Courbe DRX de la vase de Fergoug.....	55
Figure I.36 : Courbe ATD de la vase de Fergoug	55
Figure I.37: Résistance mécanique des quatre mélanges étudiés	56

Figures Partie II

Figure II.1: Distribution granulométrique des granulats	65
Figure II.2: Courbes granulométriques des additions utilisés.....	66
Figure II.3: la pouzzolane naturelle utilisée, (a) avant broyage, (b) après broyage.....	66
Figure II.4 : Les étapes de la préparation de la vase.....	68
Figure II.5: Organigramme résumant le travail expérimental mené dans cette étude.....	72
Figure II.6 : Calorimètre Langavant.....	75
Figure II.7 : Appareil IBERTEST (essai de flexion et compression).....	77
Figure II.8 : Essai de l'étalement.....	80
Figure II.9 : Essai de L-Box.....	81
Figure II.10 : Essai de J-Ring.....	82
Figure II.11 : Essai de stabilité au tamis.....	83
Figure II.12 : Essai de ressuage.....	83
Figure II.13 : Essai de la colonne.....	84
Figure II-14 : Coulage des moules (7x7x7) cm^3	84
Figure II-15 : La presse utilisée pour les écrasements.....	85
Figure II.16: Les échantillons du béton immergés dans les solutions acides	86
Figure II.17 : Eprouvettes de béton immergées dans les solutions sulfatiques.....	88
Figure II. 18 : L'enceinte de carbonatation accélérée utilisée dans notre étude.....	90
Figure II.19 : Schéma illustrant le principe des mesures	91

Figures Partie III

Figure III.1 : (a, b et c) Les temps de prise des pâtes à base de vase calcinée de Chorfa (VC), vase de Fergoug (VF) et pouzzolane (PZ)	94
Figure III.2 : Evolution du pourcentage en S_p des mortiers à base de pouzzolane ou de vase en fonction du dosage de l'ajout.....	95
Figure III.3: Valeurs d'étalements des trois BAP.....	97
Figure III.4: Valeurs de t_{50} des trois BAP.....	97
Figure III.5: Les taux de remplissage des trois BAP.....	98
Figure III.6 : Résultats obtenu d'après l'essai de J-Ring.....	99
Figure III.7: Taux de ségrégation des quatre BAP.....	99
Figure III.8: Ressuage des quatre BAP.....	100

Figure.III.9 (a-b-c) Évolution de la chaleur d'hydratation en fonction du temps des mortiers à base de 10,20 et 30% de vase calciné et de pouzzolane naturel.....	102
Figure.III.10 (a-b-c) Évolution du flux de chaleur en fonction du temps des mortiers à base de 10, 20 et 30% de vase calcinée et de pouzzolane naturelle.....	104
Figure III.11 : Evolution des résistances mécaniques des mortiers à base de vase de Chorfa.....	106
Figure III.12 : Evolution des résistances mécaniques des mortiers à base de vase de Fergoug.....	106
Figure III.13 : Evolution des résistances mécaniques des mortiers à base de pouzzolane.....	107
Figure III.14 : Comparaison des évolutions des résistances en compression des mortiers à 10% de vase de Chorfa, de Fergoug et de pouzzolane naturelle.....	107
Figure III.15 : Comparaison des évolutions des résistances en compression des mortiers à 20% de vase de Chorfa, de Fergoug et de pouzzolane naturelle.....	108
Figure III.16 : Comparaison des évolutions des résistances en compression des mortiers à 30% de vase de Chorfa, de Fergoug et de pouzzolane naturelle.....	108
Figure III.17 : Observation de la répartition des granulats pour le BAP T.....	109
Figure III.18 : Observation de la répartition des granulats pour le BAP VF.....	110
Figure III.19 : Observation de la répartition des granulats pour le BAP PZ.....	110
Figure III.20 : Comparaison des résistances mécaniques à la compression des différents BAP.....	111
Figure III.21 : Evolution des résistances mécaniques des BAP en fonction du temps.....	111
Figure III.22 : Variation de la masse des échantillons immergés dans l'eau douce.....	114
Figure III.23 : variation de la masse des échantillons immergés dans la solution du sulfate de sodium.....	116
Figure III.24 : Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% Na_2SO_4	117
Figure III.25 : Echantillons des différents bétons, après 360 jours d'immersion dans la solution de 5% de Na_2SO_4	118
Figure III.26 : Echantillons de BAP T, après 360 jours d'immersion dans la solution de 5% de Na_2SO_4	119
Figure III.27 : variation de la masse des échantillons immergés dans la solution de 5% MgSO_4	120
Figure III.28 : Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% MgSO_4	122
Figure III.29 : Echantillons de différents bétons, après 360 jours d'immersion dans la solution de 5% de MgSO_4	123
Figure III.30 : Echantillons de BAP T, après 360 jours d'immersion dans la solution de 5% de MgSO_4	123
Figure III.31. Perte de masse des bétons âgés de 90j et immergés dans la solution H_2SO_4	126
Figure III.32 : Dégradation des échantillons du béton après 6 semaines d'immersion dans la solution d'acide sulfurique.....	127
Figure III.33. Variation de la perte en poids des BAP en fonction de la période d'immersion en 5% HCl	129
Figure III.34 : Dégradation des échantillons du béton après 4 semaines d'exposition aux solutions d'acide chlorhydrique.....	130
Figure III.351 : Fronts de carbonatation visualisés par pulvérisation à la phénolphthaléine.....	132
Figure III.36: Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée des bétons.....	132
Figure III.37: Carbonatation naturelle à 12 mois.....	133
Figure III.38: Profondeur de carbonatation naturelle des bétons d'études, après 15 mois à l'air libre de laboratoire.....	134

Liste des Tableaux

Tableaux Partie I

<i>Tableau I.1 : Résultats de résistance en compression à 28 jours et en fin d'essai de vieillissement accéléré pour les bétons d'ouvrage d'art testés</i>	37
<i>Tableau I.2: Valeur de la profondeur de carbonatation</i>	40
<i>Tableau I.3 : Quelques barrages envasés en Algérie</i>	45

Tableaux Partie II

<i>Tableau II.1: Composition chimique du ciment</i>	63
<i>Tableau II.2: Composition minéralogique (%) du clinker</i>	63
<i>Tableau II.3 : Analyse chimique des granulats</i>	64
<i>Tableau II.4: Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques des granulats utilisés</i>	64
<i>Tableau II. 5 : Analyse chimique de la pouzzolane naturelle</i>	67
<i>Tableau II.6 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle</i>	67
<i>Tableau II.7 : Caractéristiques chimiques des vases après calcination</i>	68
<i>Tableau II.8 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques de la vase</i>	69
<i>Tableau II.9 : Caractéristiques des adjuvants</i>	69
<i>Tableau II.10 : Formulation des mortiers</i>	76
<i>Tableau II.11 : Compositions des BAP</i>	78
<i>Tableau II.12: Caractéristiques des BAP confectionnés</i>	79

Tableaux Partie III

<i>Tableau III.1 : Les temps de début de prise, de fin de prise et les temps de prise des différentes pâtes</i>	93
<i>Tableau III.2 : Dosages du plastifiant des mortiers à base de vase calcinée de Chorfa et Fergoug</i>	95
<i>Tableau III.3 : Dosages du plastifiant des mortiers à base de pouzzolane naturelle</i>	95
<i>Tableau III.4 : Les résultats des essais de caractérisation à l'état frais</i>	96

ملخص

نظرا للخصوصيات التي تتعلق بالخرسانة الذاتية الوضع وخاصة فيما يتعلق بحجم العجينة الكبير , و وجود الإضافات المعدنية بكميات معتبرة , سلوكها قبل وبعد التصلب بالإضافة إلى ديمومتها جد متأثرين بهذين العاملين

يمكن استخدام رواسب ذات خصائص بوزولانية كإضافات أو استبدالات جزئية للإسمنت وتقييمها لتطوير تكنولوجيا الخرسانة .

هذه الدراسة تهدف إلى المساهمة في تعزيز إعادة استخدام الطين المحروق لسد الشرفة و فرقوق (غرب الجزائر) كبديل جزئي معدني للإسمنت CPA 42.5 لأجل تكوين ملاط و خرسانة ذاتية الوضع. هذا ينطوي على المقارنة بين الطين وبوزولان بني صاف (غرب الجزائر) في التأثير على الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية و ديمومة هذا النوع من الخرسانة في المدى القصير, المتوسط و الطويل .

أجريت الدراسة على أربعة خرسانات ذاتية الوضع , الأولى تحتوي على نسبة 20% من بوزولان بني صاف (BAP-PZ) , الثانية والثالثة نسبة 20% من الطين المحروق (BAP-VC) لسد الشرفة و فرقوق (BAP-VF) وأخيرا خرسانة ذاتية الوضع كشاهد من أجل المقارنة .

الخرسانة ذاتية الوضع التي تحتوي على الطين المحروق لا يعني أنها تحقق فائدة اقتصادية فحسب ,إنما تمكننا من الحصول وهذا من خلال دراستنا على خرسانة ذات خصائص مشابهة لخرسانة البوزولان (BAP-PZ). مع تفوق طفيف في المقاومة للضغط لصالح (BAP-VF) و (BAP-VC) في المدى الطويل.

أما نتائج الاختبار لهجوم أحماض (HCl H_2SO_4), كبريتات (Na_2SO_4 $MgSO_4$) وغاز CO_2 تبين أن تأثيرات الطين المحروق أفضل من البوزولان على الخواص الفيزيائية و الميكانيكية و ديمومة الخرسانة التي تحتويها.

الكلمات الرئيسية: سد الشرفة - سد فرقوق - الطين المحروق - البوزولان - الخرسانة ذاتية الوضع - مقاومة ميكانيكية - ديمومة .

Résumé

En raison des spécificités relatives à la formulation des bétons autoplaçants (BAP) et en particulier celles concernant 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.

Certains sédiments traités acquièrent des propriétés pouzzolaniques et peuvent être utilisés en tant qu'ajouts ou substituts au ciment. Ceci peut faire de la technologie des bétons une voie privilégiée pour leur valorisation.

La présente étude vise à apporter une contribution à la valorisation de la vase traitée du barrage de Chorfa et de Fergoug, (située à l'ouest algérien) en tant que substitut minéral partiel au ciment CPA CEMI 42.5 dans la composition des mortiers et des bétons autoplaçants. Il s'agit de comparer l'influence de l'incorporation de cette vase calcinée à celle de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (situé, également à l'ouest algérien) dans les BAP sur leurs caractéristiques physico-mécaniques et sur leur durabilité à court, moyen et long terme.

L'étude est menée sur quatre BAP, le premier à base de 20 % de pouzzolane naturelle de Béni-Saf (BAP-PZ), le deuxième et le troisième incorporant 20 % de la vase calcinée issue des sédiments de dragage du barrage de Fergoug (BAP-VF) et de celui de Chorfa (BAP-VC) et enfin un BAP témoin sans ajouts pour le besoin de comparaison.

Outre l'intérêt économique que présentent les BAP à base de vase calcinée, notre étude a montré que ces derniers présentent des performances très comparables à celles obtenues sur des BAP à base de pouzzolane naturelle (BAP-PZ).

En effet, Concernant les résistances à la compression, notre étude indiquent que les BAP à base de vase ((BAP-VC) et (BAP-VF)) présentent les meilleurs résultats notamment à long terme.

Les résultats des essais de l'attaque acide (HCl et H₂SO₄), l'attaque sulfatique (Na₂SO₄ et MgSO₄) et 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 des bétons dans lesquels elle est incorporée.

Mots clés : Barrage de Chorfa - Barrage de Fergoug –Vase calcinée – 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 behavior in fresh and hardened state and the durability of these concretes are strongly influenced by these two parameters.

Some treated sediments acquire pozzolanic properties and can be used as additions or substitutes to the cement. This possibility makes of concrete technology a privileged way of enhancement.

The present study aims to contribute to the enhancement of the treated mud of Chorfa and Fergoug dam (situated in west of Algeria) as a mineral partial substitute for CPA CEMI 42.5 cement in the composition of an economic and preferment mortars and self-compacting concretes. The aim is to compare the influence of the incorporation of this calcined mud to the natural pozzolana of Beni Saf (situated, also in west of Algeria) in (SCC) on their physical, mechanical behavior and their durability of these concretes in short, medium and long term.

The study was conducted on four SCCs, the first based on 20% natural pozzolana Beni Saf (SCC-PZ), the second based on 20% of the calcined mud of Fergoug dam (SCC-VF) and of Chorfa dam (SCC-VC) and a control SCC without additions to the need for comparison .

Apart from the economic interest of the SCCs based on calcined mud, our study showed that these concretes have comparable performances to that obtained on SCC based on natural pozzolana (SCC-PZ).

In fact, concerning compressive strengths, our study indicate that the SCC with calcined mud ((SCC-VC) and (SCC-VF)) present the best results especially at long term

The results of the different following tests: the acid attack (HCl and H₂SO₄), carbonation and sulphate attack (Na₂SO₄ and MgSO₄) show that the calcined mud has an influence roughly better than the natural pozzolana on the physic - mechanical behavior and durability of the SCC which it is incorporated.

Key words: Dam of Chorfa – Dam of Fergoug – Calcined mud – Pozzolana – SCC containing mud - SCC containing pozzolana – Mechanical strength –Durability.

INTRODUCTION GENERALE

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 montré 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.

En Algérie les questions liées aux dragages se rapportent principalement au coût de ces opérations, mais qui demeurent néanmoins indispensables. Toutefois, cette solution se retrouve confrontée à un sérieux problème d'espace de stockage et/ou 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 la préservation de l'environnement.

Le parallèle 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. Cette idée, semble être une voie prometteuse, si on considère l'intérêt mutuel 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 des barrages de Chorfa et de Fergoug a donné plus de crédibilité à cette voie de valorisation en tant que matière première dans le secteur du génie civil.

C'est pourquoi, cette étude a été engagée dans un but écologique, économique et technique en valorisant la vase traitée thermiquement comme étant un matériau de construction à part entière substituable en partie au ciment entrant dans la composition des BAP pour lequel le comportement physico-mécanique et de durabilité a été suivi.

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 leur durabilité. Les recherches publiées concernant l'influence du type d'addition minérale sur les propriétés de durabilité des BAP sont également présentés. Le troisième chapitre évoque la valorisation des différents déchets minéraux et en particulier la pouzzolane naturelle de Beni-Saf dans le béton autoplaçant. Dans ce même chapitre, le phénomène d'envasement affectant les barrages de Chorfa et de Fergoug est abordé ainsi que les possibilités de valorisation de la vase issue de ces barrages dans la technologie des BAP.

La deuxième partie, composée de deux chapitres, décrit les matériaux utilisés et les formulations des mortiers et des BAP adoptées au cours de nos travaux. Dans le premier chapitre, sont décrits les matériaux utilisés dans la composition de nos bétons. Ces derniers, sont formulés avec les des mêmes constituants, le même squelette granulaire et un rapport E/C identique. Dans le second chapitre, sont présentées les méthodes d'essais permettant de mesurer des grandeurs physico-mécaniques (chaleurs d'hydratation des mortiers et résistances la compression) et de durabilité (résistance aux attaques acides (HCl et H₂SO₄), attaques sulfates de sodium (Na₂SO₄) et de magnésium (MgSO₄) et enfin l'attaque du dioxyde de carbone (CO₂) à travers la carbonatation accélérée et naturelle).

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

Enfin, nous clôturons cette étude par une conclusion générale qui recouvrera les principaux résultats dégagés et les perspectives envisageables pour le futur.



PARTIE I
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE



CHAPITRE I



***GENERALITES SUR LES BETONS
AUTOPLAÇANTS***

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES BETONS AUTOPLAÇANTS

I.1. INTRODUCTION

En raison de ses propriétés spécifiques, l'étude du béton autoplaçant (BAP) représente un domaine de recherche qui possède un fort potentiel de développement. Le développement d'un BAP économique ayant des propriétés intéressantes à l'état frais et à l'état durci est important pour qu'un tel béton soit employé dans l'industrie du bâtiment.

Pour trouver de nouvelles solutions économiques s'ajoutant aux solutions techniques, des recherches sur les BAP économiques ont été conduites au cours de ces dernières années. Cependant, la quantité très importante de l'addition minérale dans la formulation des BAP, nous laisse penser que l'utilisation des ajouts minéraux naturels et économiques semble être l'une des solutions envisageables pour l'avenir des BAP.

La technologie des bétons autoplaçants est capable de consommer d'énormes quantités d'additions, parce que la formulation du BAP comporte une grande quantité de fines (*environ 500 kg/m³*). Ces dernières pourraient améliorer les caractéristiques et performances de ce type de béton. Parmi ces additions on note l'utilisation des fines calcaires, des laitiers, de la pouzzolane naturelle telle que celle de Béni-Saf (ouest algérien) et les pouzzolanes artificielles telles que le métakaolin et la vase issue des dragages des barrages envasés

Dans ce chapitre sont exposés les différents critères qui caractérisent les BAP, à l'état frais, ainsi que l'influence des différentes additions sur les propriétés des BAP à l'état frais et durci.

I.2. NOTION DU BETON AUTOPLAÇANT

Les bétons autoplaçants (BAP ou SCC en anglais, pour self-compacting concrete) ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores. L'idée de la formulation du BAP est liée à l'observation du comportement de béton coulable sous l'eau (ouvrages marins) en utilisant un viscosant afin d'améliorer la cohésion entre les particules du ciment et un superplastifiant pour assurer la fluidité de ce béton [1].

Le béton autoplaçant 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 seulement à l'état durci ils présentent un comportement mécanique et une durabilité plus faibles par rapport aux bétons vibrés [2]. Ce qui distingue véritablement les BAP des bétons fluides ordinaires, c'est leur capacité à s'acheminer dans les coffrages tout en conservant leur homogénéité et leur compacité.

L'utilisation des BAP offre de nombreux avantages à la pratique de la construction. Globalement, leur utilisation permet d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis, ainsi que la possibilité de coulage dans des zones fortement ferrillées, d'architecture complexe et 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/liant et/ou en incorporant un dosage adéquat en superplastifiant.

Selon Khayat [3], le BAP doit assurer le compromis entre deux propriétés tout à fait contradictoires : une grande fluidité et une grande stabilité.

Un BAP assure en effet, un remplissage complet des coffrages même quand l'accès est gêné par des vides étroits entre les barres d'armatures ou dans des coffrages ayant des formes complexes. Pour se faire, le béton frais doit présenter simultanément, une grande fluidité et une bonne stabilité.

En plus, ces bétons présentent d'autres avantages qui justifient l'intérêt nouveau que leur portent les industriels [4] :

- 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 peuvent être observées sur cet élément structural.

- Amélioration de la qualité des parements.

I.3. CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS

Les BAP sont caractérisés principalement par les propriétés à l'état frais et par conséquent, la caractérisation et le contrôle des propriétés à l'état frais sont essentiels pour assurer les performances souhaitées des BAP.

Le comportement d'un BAP à l'état frais se différencie notablement de celui d'un béton ordinaire vibré (BOV). Son ouvrabilité se décline classiquement suivant : sa mobilité en milieu non confiné, sa mobilité en milieu confiné et sa stabilité (vis-à-vis de la ségrégation et du ressuage) [5]. La caractérisation d'un tel béton est donc plus complexe que celle d'un béton traditionnel et implique des essais spécifiques.

Des recommandations de caractérisation ont été préconisées par l'Association Française de Génie Civil (AFGC) [6]. D'abord provisoires, ces recommandations sont devenues in situ les essais de référence pour valider une formulation de BAP.

I.3.1. 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 cotés perpendiculaires. Les valeurs sont relevées en millimètres (Figure I.1).

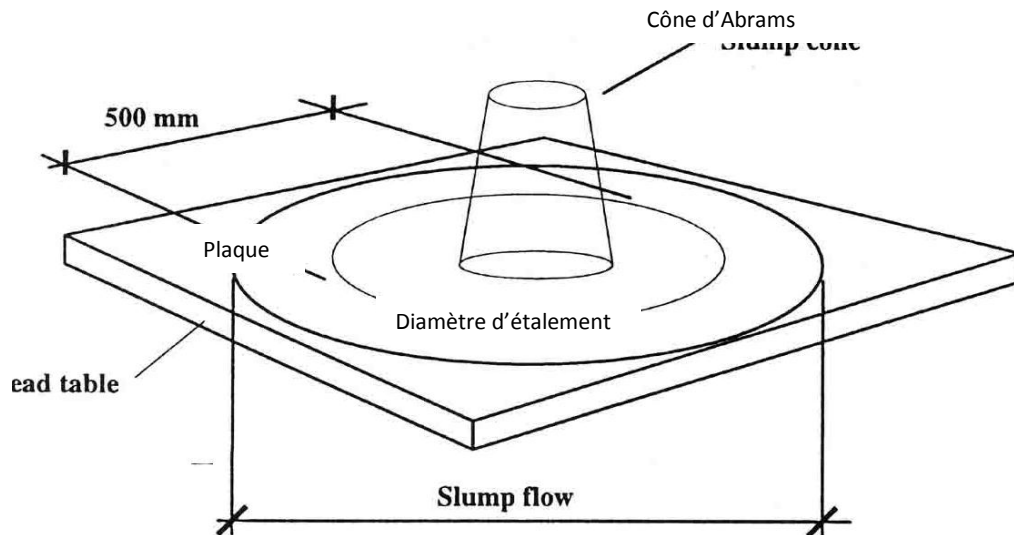


Figure I.1: Essai d'étalement au cône (slump flow)

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

I.3.2. 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.2).

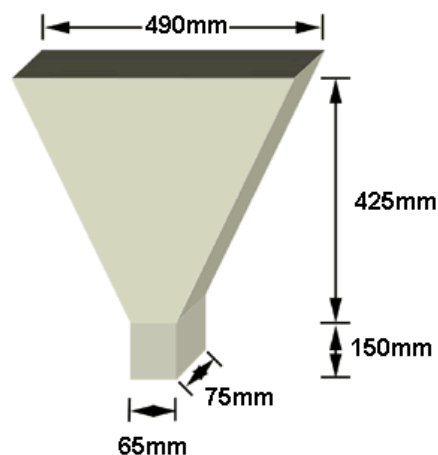


Figure I.2. L'essai V-funnel

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.

Les temps d'écoulement au V-funnel dépendent également du type d'application, mais ne sont regroupés que selon 2 classes [7]

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

I.3.3. Essai de la boîte en L

L'essai de la boîte en L (Figure I.3) fait partie des essais de caractérisation de la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique. Il vérifie que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures.

La partie verticale de la boîte en L est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard qui correspond à des ouvrages très ferrailés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre 2 barres) [6].

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs H_2/H_1 , voir Figure I.3) doit être supérieur à 0,8 [6]. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

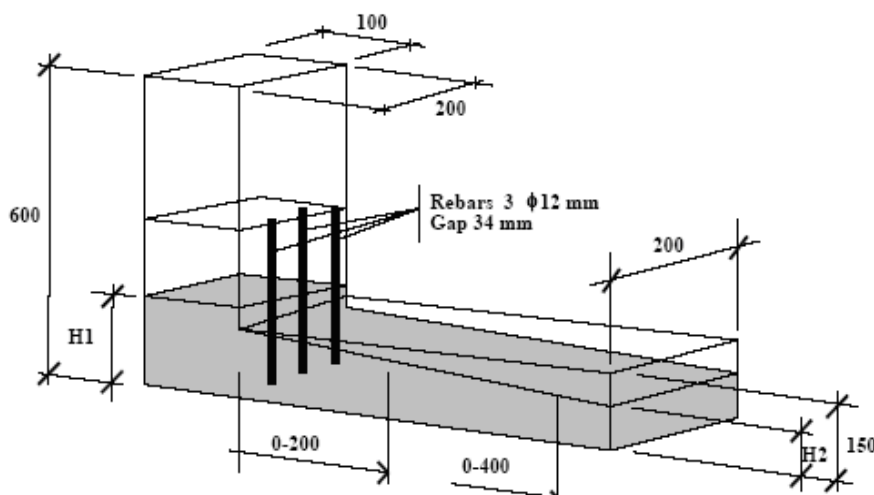


Figure I.3: Essai de la boîte en L

I.3.4 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 I.4). On caractérise donc la tendance à la ségrégation et l'enrobage d'armatures. De plus, la répartition des granulats doit être homogène.

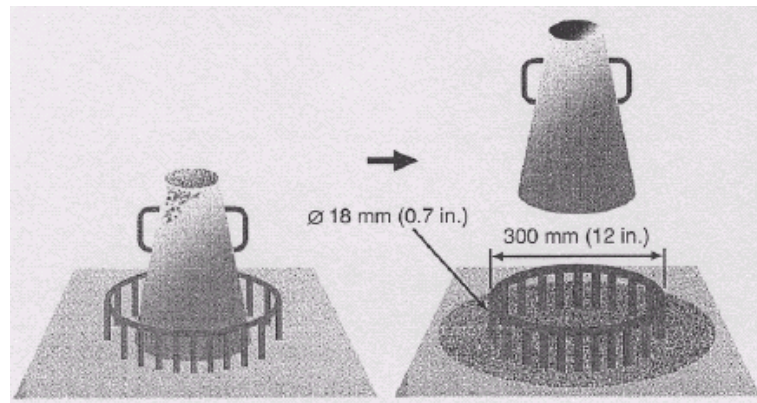


Figure I.4: Essai J. Ring

I.3.5 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 [8].

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 [9].

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 [9].

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 $PLAITANCE$ par la suite) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm (figure I.5) [6].

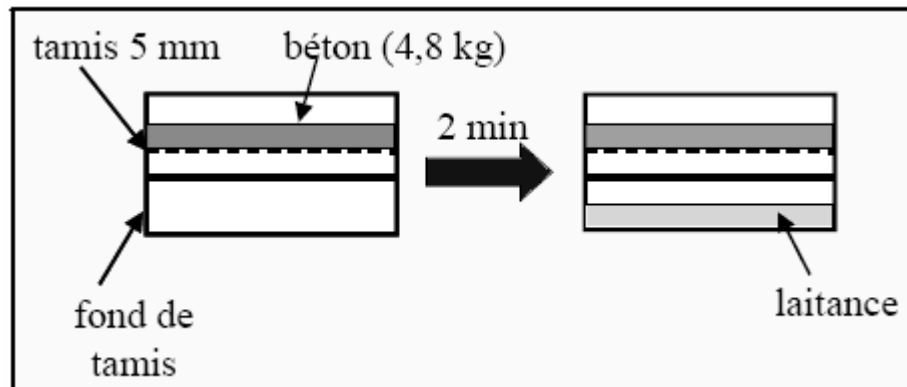


Figure I.5: Essai de stabilité au tamis [6]

Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes:

- ❖ $0\% < PLAITANCE < 15\%$: stabilité satisfaisante,
- ❖ $15\% < PLAITANCE < 30\%$: stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser sur site),
- ❖ $PLAITANCE > 30\%$: 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 ressuage n'excédant pas les 3 ‰ est synonyme d'une stabilité correcte. Les BAP à $(E/C = 0,6)$ 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 [10].

Les recherches ont montrées que le ressuage 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 [10].

I.3.6 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. Ainsi, 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 [11].

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 C_3A ou par l'ajout du chlorure de calcium minimisant ainsi considérablement le ressuage [9].

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 $150\mu m$), permet une réduction du ressuage. En réalité, lorsque les granulats fins concassés contiennent une quantité importante de matériaux très fins (plus de 15% passant au tamis $150\mu m$), le ressuage est diminué, mais les matériaux très fins doivent contenir uniquement de la poussière de concassage et non des particules d'argile [11].

L'ajout de cendres volantes ou de fumée de silice dans le mortier réduit le ressuage de façon significative [12]. 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 [9].

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 de prise, 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 [9].

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 [13].

I.4 FORMULATION DES BAP

La formulation des BAP se distingue des bétons dits ordinaires vibrés (BOV) par, principalement, le volume de la pâte élevé (ciment + additions + eau efficace), l'ajout d'une grande quantité d'addition minérale (qui sert de substitut aux gravillons ou au ciment) et l'emploi de superplastifiants. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie et des performances souhaitées.

Pour l'optimisation de la formulation des BAP, plusieurs approches ont été conçues à savoir : l'approche japonaise d'Okamora [4], l'approche française du LCPC [14], l'approche suédoise par Petersson et al. [15]. D'autres méthodes ont été développées telles que la méthode de Khayat et al. [16] qui est basée sur le plan d'expériences et celle d'Oh et al. [17] qui repose sur la théorie de l'excès de pâte [18].

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement varier d'une approche à l'autre.

I.4.1 Volume de gravillons

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.

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 gravillons.

I.4.2 L'emploi de superplastifiants

Les superplastifiants permettent 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.6). 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 [19].

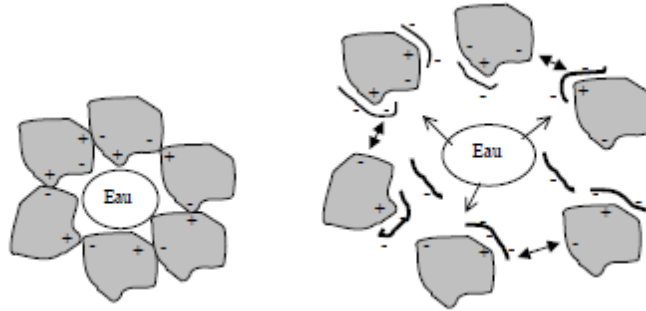


Figure I.6 : Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment [20]

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.7).

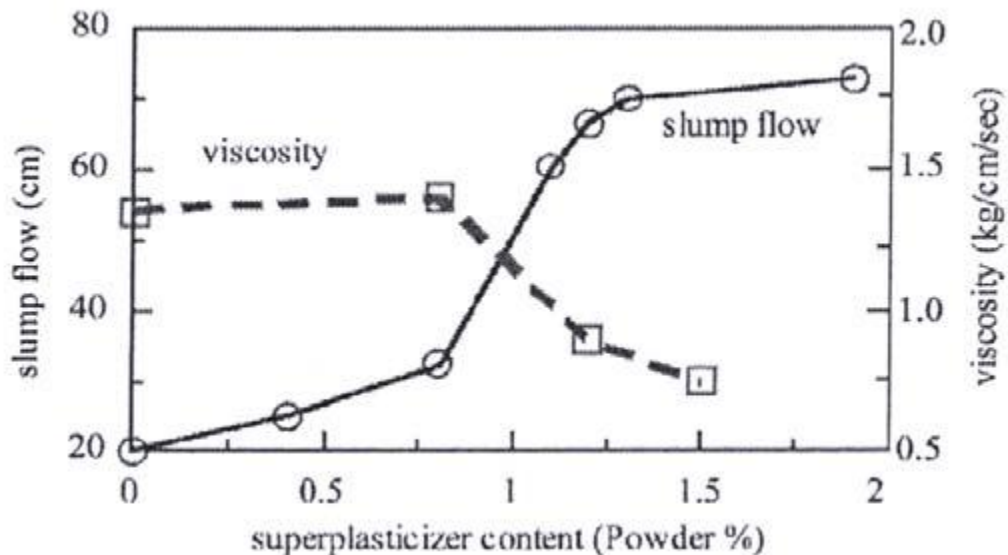


Figure I.7 : Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [21]

I.4.3 Une quantité d'addition ($\emptyset < 80 \mu\text{m}$) importante

Les compositions de 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 [22].

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
- 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 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.) [6] et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions et leur proportion respective.

I.4.3.1 Fillers calcaires

Ils sont soumis 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 [23]. Les fillers calcaires cumulent trois propriétés intéressantes : une certaine activité hydraulique, des éléments de faible dimension qui permettent un remplissage granulaire efficace et un faible coût [24].

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 [24]. 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 [24]. 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 [24] ;
4. Un rôle de densification sur le béton.

1.4.3.2 Cendres volantes:

Ce sont des poudres fines constituées principalement de particules vitreuses de forme sphérique, dérivées de la combustion du charbon pulvérisé, ayant des propriétés pouzzolaniques (capacité de fixer la chaux libérée par l'hydratation du ciment) 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, 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 [25].

1.4.3.3. Fumées de silice :

Les fumées de silice sont formées de particules sphériques très fines ($D_{50} \approx 0,1 \mu\text{m}$) ayant une très haute teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium. Elles doivent contenir au minimum 85% (en masse) de silicate amorphe pour qu'elles entrent dans la fabrication du ciment. Les grains ont la forme de sphères quasi-parfaites, la granulométrie s'étend de $1/1000 \mu\text{m}$ jusqu'à quelques microns, avec une taille moyenne de $0.2 \mu\text{m}$.

Selon Traetteberg [26], un taux d'incorporation de fumée de silice supérieur à 25 % permet la consommation totale de la portlandite par réaction pouzzolanique. Le taux de substitution du ciment par de la fumée de silice dans les ciments commerciaux reste faible (10 %, limite

imposée par la norme EN 197-1) de manière à conserver un caractère suffisamment basique au béton permettant de garantir la passivité des armatures.

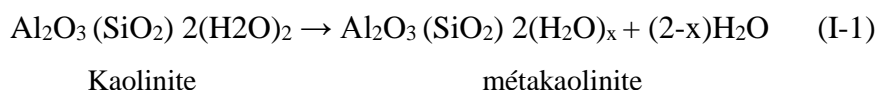
1.4.3.4 Laitier de hauts fourneaux:

Il provient 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 [23]. 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.

1.4.3.5 Les Métakaolins

La kaolinite est un aluminosilicate qui est largement utilisé comme matériau de construction. La cuisson de cette argile permet de créer un matériau de construction : le métakaolin issu de cette activation thermique. Il devient une pouzzolane de synthèse utilisée comme addition minérale dans les liants hydrauliques. Le métakaolin est un matériau possédant un potentiel élevé d'activité pouzzolanique.

La calcination de la kaolinite et sa transformation en métakaolin peut être effectuée entre 600 et 800 °C. La température de calcination dépend du degré de pureté en kaolin [27] [28]. Durant ce processus il se produit la réaction donnée par la formule I-1:



Le composé formé est la métakaolinite (kaolinite calcinée). Selon le taux de pureté du kaolin initial, le métakaolin formé peut contenir d'autres phases mineures telles que le quartz ou les feldspaths...etc.

La durée du traitement thermique est couramment de cinq heures dans un four rotatif. Lorsque l'argile kaolinique est montée en température, son système cristallin se transforme et selon la température à laquelle est arrêtée la calcination, nous obtenons différentes espèces comme le présente la figure I.8.

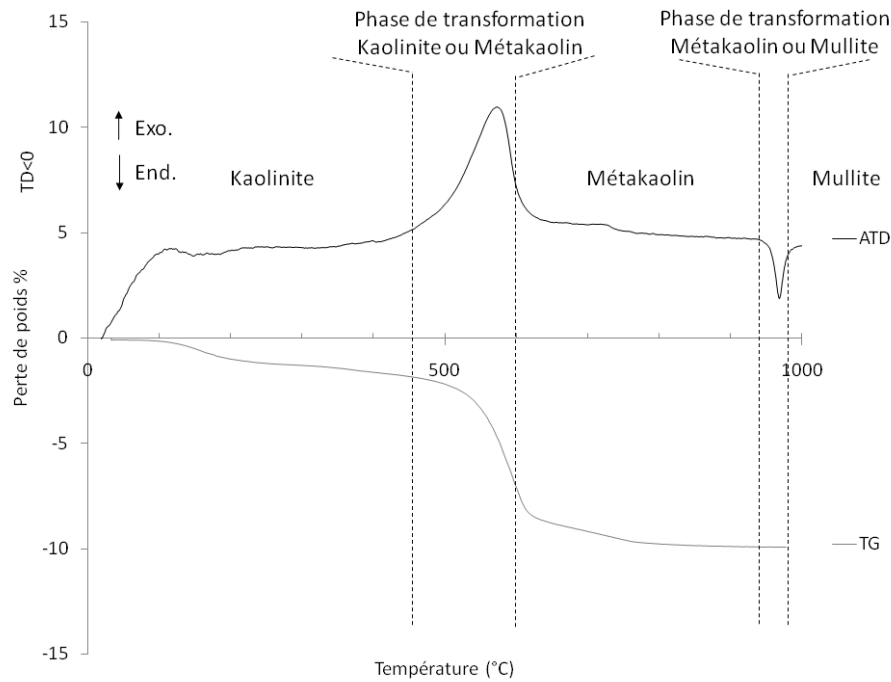


Figure I.8 : Spectres d'analyse thermique (ATG/ATD) de la kaolinite [29]

I.4.4. Influence des additions minérales sur les propriétés des BAP

I.4.4.1 Fillers calcaires

D'après certaines études, 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 [24]. 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 massive du ciment par les fines calcaires [24].

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 [24]. Zhu et Gibbs [30], 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.

Différents résultats ont été publiés [31] [32] sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des BOV (bétons ordinaires vibrés) et soutiennent les affirmations précédentes (Figure I.9).

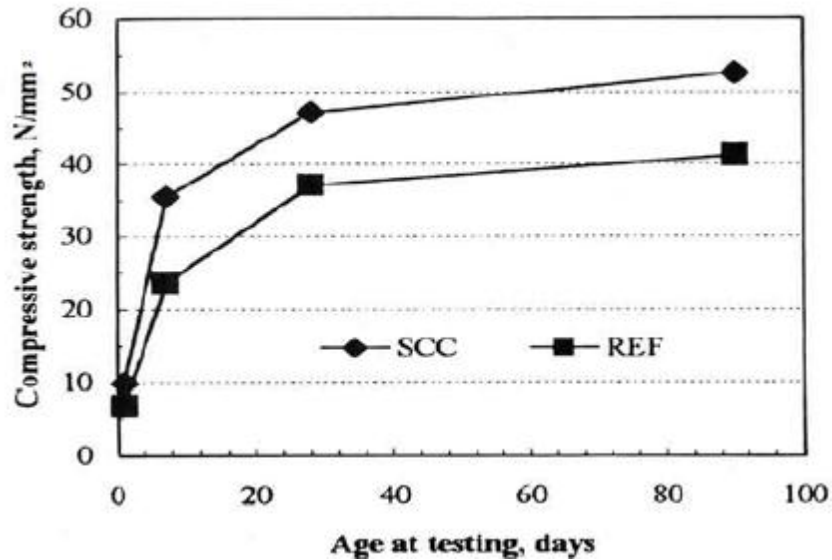


Figure I. 9 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP à base d'addition filler calcaire et d'un BOV correspondant [31]

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 I. 10). Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours [33].

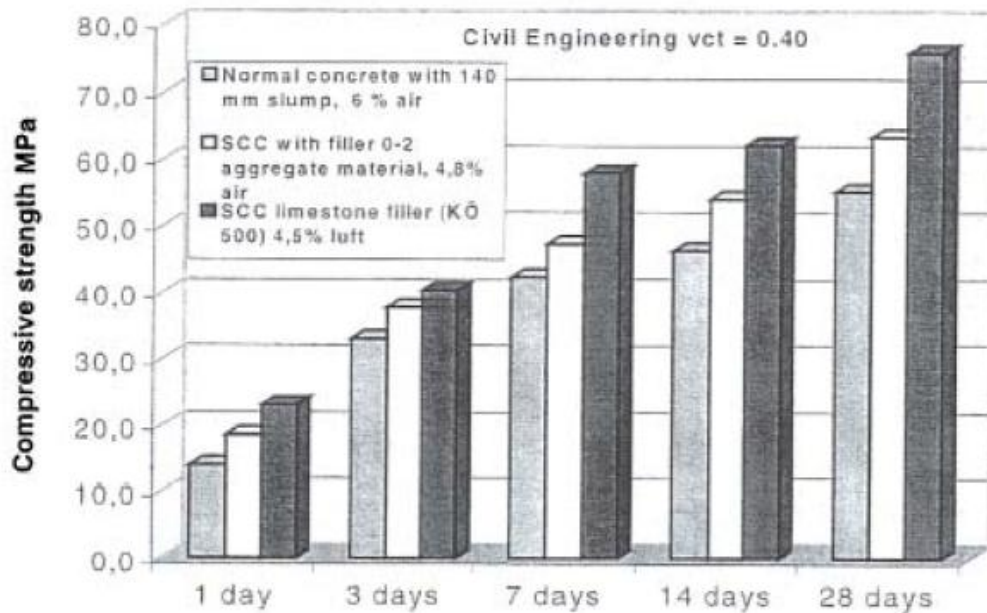


Figure I. 10: Résistance mécanique d'un BOV et de 2 BAP à base de filler calcaire [33].

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].

1.4.4.2 Cendres volantes

Les cendres volantes ont été utilisées avec succès dans les BAP [36]. Leur utilisation 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 [37] a constaté que l'utilisation de cendres volantes réduit ces deux paramètres dans le cas des BAP. Cependant, Park et al. [38] ont constaté que la cendre volante a une faible incidence sur le seuil de cisaillement et sur la viscosité de la pâte de ciment. Les cendres volantes peuvent aussi réduire la ségrégation et améliorer la stabilité [39]. 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. [40] 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 [40].

La cendre volante influe positivement sur la résistance à la compression des BAP [41]. Son effet le plus notable est d'augmenter la résistance à long terme par réaction pouzzolannique. Selon Felekoglu et al. [42], l'utilisation de cendres volantes (classes C et F) dans les BAP entraîne une réaction entre la phase vitreuse des cendres et la portlandite (CH) produite par l'hydratation du ciment, ce qui conduit à la formation de gel de CSH, et donc l'augmentation de la résistance en compression, surtout à long terme avec le développement de la réaction pouzzolannique des cendres volantes. Contrairement aux cendres volantes de classe C, celles de classe F réduisent le développement de la résistance au jeune âge du béton mais augmente sa durabilité [43].

Felekoglu et al. [42] ont étudié l'effet des différentes additions minérales (filler calcaire et cendre volante) sur la résistance à la compression des BAP. Ils ont trouvé que les BAP à base de cendres volantes montrent des résistances plus élevées que celles des BAP à base de fillers calcaires.

Obla et al. [44] ont étudié des BAP à base de cendres volantes très fines (avec une granulométrie moyenne de 3 micromètres, et 90% des matériaux plus petits que 7 μm). Selon ces auteurs, cette taille plus fine conduit à une réaction accrue et une grande augmentation de la résistance à la compression.

Patel et al. [45], Christensen et Ong [46] et Khatib [47] ont remarqué une amélioration significative de la résistance à la compression dans le cas de l'utilisation d'un volume élevé de cendres volantes.

1.4.4.3 Fumées de silice

L'influence des fumées de silice n'est pas très claire. Pour certains auteurs [38] [40] [48], les fumées de silice augmentent le seuil de cisaillement et la viscosité tout en améliorant la compacité des mélanges. Par contre, pour Carlswald et al. [49], elles ne modifient pas la

viscosité. Par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence, Ferraris et al. [40] 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.

Par ailleurs plusieurs études montrent que la présence de fumées de silice accélère la réaction d'hydratation du ciment portland (figure I.11). Cet effet accélérateur est important lorsque celles-ci sont utilisées avec un fluidifiant [49]. 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 [49].

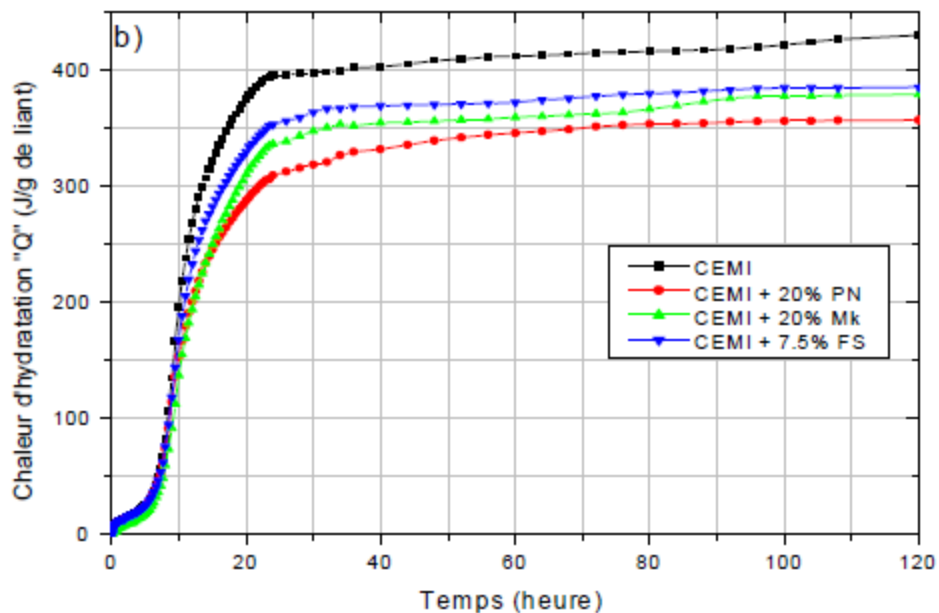


Figure I.11: Courbes de chaleur d'hydratation des différents mélanges -essai de calorimétrie- [49]

Senhadji [49] a montré que la chaleur d'hydratation ainsi que le flux de chaleur maximum des mortiers diminuent avec le remplacement du ciment Portland ordinaire par les différents ajouts pouzzolaniques (pouzzolane naturelle : PN, métakaolin : Mk et fumée de silice : FS) (figure I.12).

L'évolution de la température d'hydratation des mortiers montre que la température maximale d'hydratation des mortiers avec ajout diminue par rapport au mortier témoin. Il en résulte que le risque de fissuration est moindre. Cela est peut être dû au caractère lent de la réaction pouzzolanique, comparé à la réaction d'hydratation du C_3S [49].

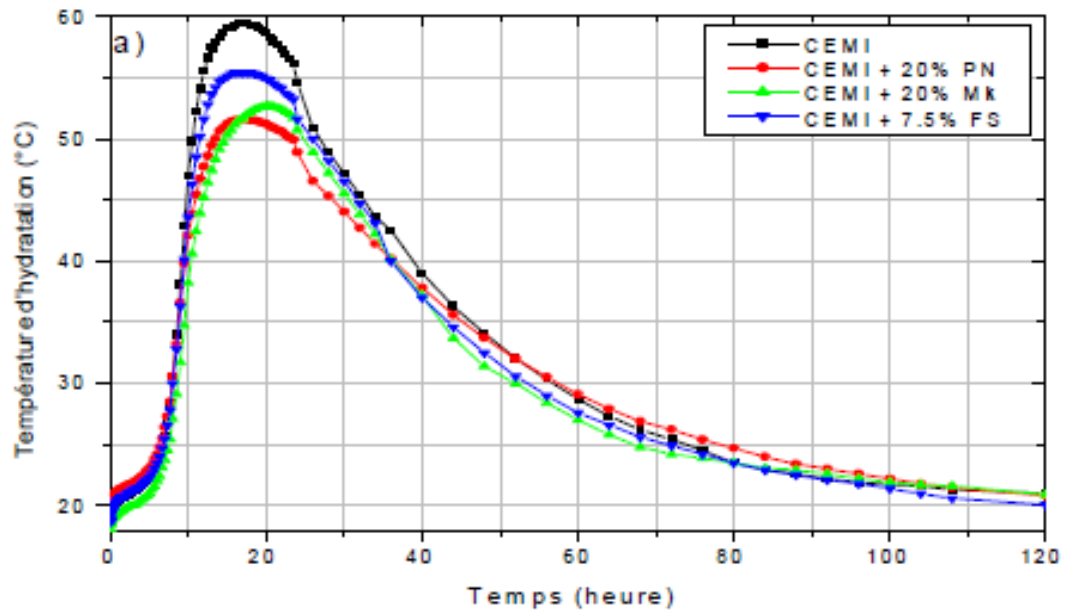


Figure I.12 : Courbes d'élévation de la température en fonction du temps de différents mélanges -(essai de calorimétrie). [49]

L'effet de dilution de la pouzzolane naturelle, du métakaolin et de la fumée de silice apparaît dans la diminution du pic du flux de chaleur. Ce dernier correspond à la formation accélérée des hydrates. [49]

La fumée de silice a été aussi utilisée avec succès dans les BAP [36]. Son utilisation augmente considérablement la résistance à la compression des BAP. Cette augmentation est remarquée particulièrement au jeune âge comparé aux autres BAP à base de cendre volante [50].

1.4.4.4 Laitiers de hauts fourneaux

L'utilisation du laitier permet de diminuer la quantité de chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment et d'augmenter les hydrates dans la pâte.

Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire la viscosité des pâtes de ciment [38] [48]. Shi et al. [48] montrent par exemple que les laitiers 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.

Menendez et al. [51] ont étudié le développement de la résistance des liants ternaires contenant des fillers calcaires et du laitier. Ils ont trouvé que la combinaison des fillers calcaire et du laitier de haut fourneau est complémentaire.

Les fillers calcaires améliorent la résistance du ciment au jeune âge tandis que le laitier de haut fourneau améliore la résistance à long terme. Ils ont montré que le mélange de ciment ternaire offre un avantage par rapport aux ciments binaires et aux ciments Portland sans ajouts. Ces auteurs ont trouvé une combinaison optimale renfermant 70% de ciment Portland, 20% de laitier et 10% de filler calcaire.

1.4.4.5 Métakaolin

L'un des critères qui qualifie un béton autoplaçant est son étalement, qui doit être compris entre 60 et 75 cm. Une étude [52] a prouvé que le béton témoin ainsi que le béton avec 25% de métakaolin (MKF) respecte cette caractéristique. Seul le mélange filler (F) plus métakaolin entraîne une diminution de l'étalement par rapport au témoin (figure I.13).

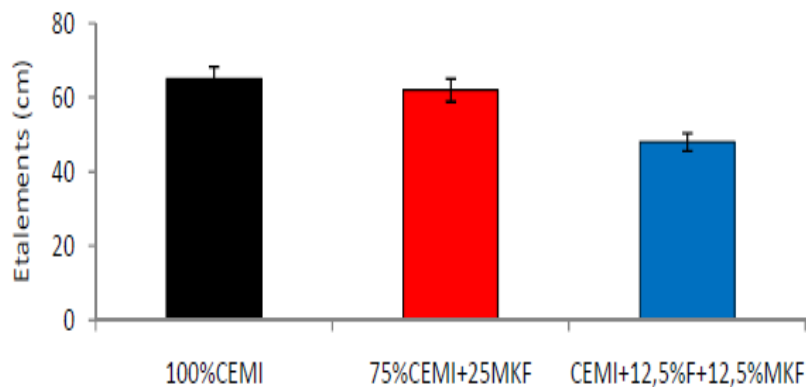


Figure I.13: Etalements des bétons autoplaçants [52]

Par ailleurs, lors de la manipulation des BAP celui avec 25% de MKF semblait plus visqueux que le béton témoin, ce qui peut être un avantage pour des problèmes propres à ce type de béton tel que la ségrégation [52].

Plusieurs auteurs [53] [54] [55] [56] ont travaillé sur la demande en eau des métakaolins dans des pâtes, mortiers et bétons en concluant toujours que la demande en eau augmentait avec la quantité de métakaolin introduite.

De plus, Moulin [57] affirme que le métakaolin augmente significativement la thixotropie du mélange entre 5 et 90 minutes, comparativement à un mélange contenant uniquement du ciment. Ce dernier point pourrait s'avérer avantageux pour faciliter le démoulage immédiat. Cependant cette influence n'a pas été confirmée par d'autres chercheurs.

D'après Khatib et al. [58], la résistance mécanique en compression de mortiers incorporant différents taux de métakaolins (0, 5, 11 et 15 %) est augmentée par rapport à un mortier avec seulement du ciment. Pour ces mortiers, le taux optimal de substitution est compris entre 10 et 20% [58]. Pour des taux supérieurs, les auteurs rapportent que les performances mécaniques diminuent vers des valeurs inférieures à celles des matériaux sans métakaolin.

La Figure I.14 représente l'écart des résistances en compression des BAP à 7 jours.

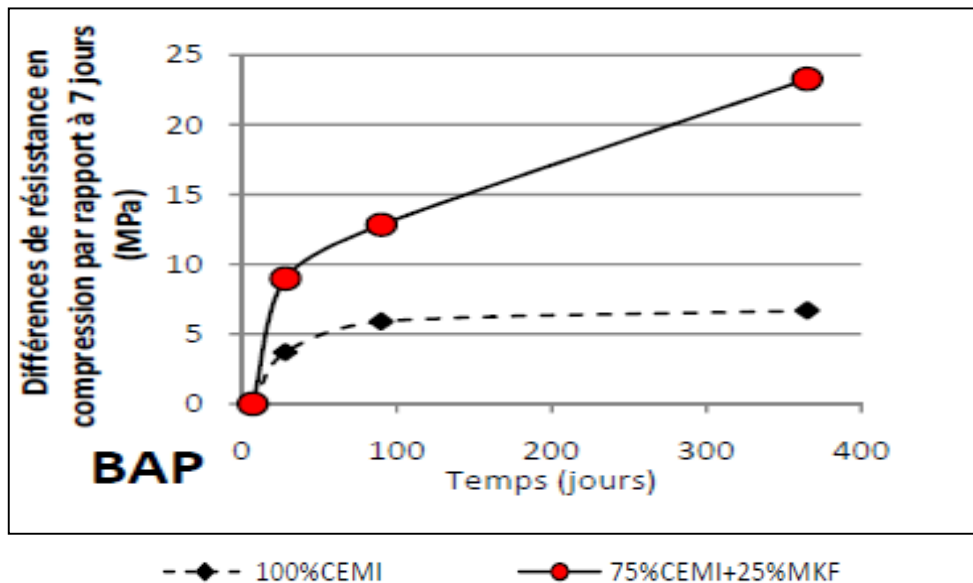


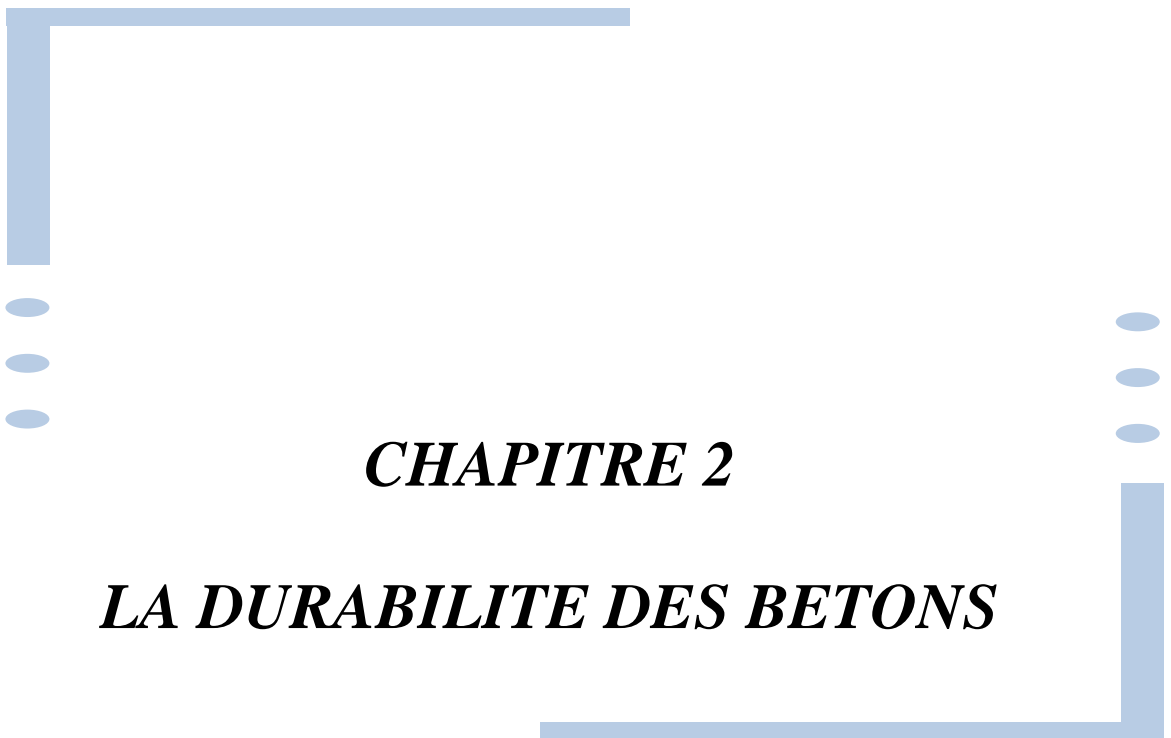
Figure I.14 : Evolution des écarts de résistances en compression des BAP entre 7 jours et les autres échéances en fonction du temps [52]

La cinétique de réaction des bétons avec le métakaolin est de toute évidence différente de celle des bétons témoins. Les bétons témoins avec 100% de CEMI voient leurs résistances augmenter encore entre 7 et 90 jours. Au-delà de cette échéance les résistances semblent maintenues mais elles n'augmentent plus. En ce qui concerne les mélanges avec 25% de métakaolin, Rackel [52] a observé une augmentation plus importante des résistances par rapport au témoin après 7 jours, et il a également noté qu'après 1 an les résistances n'ont toujours pas cessé d'augmenter.

I.5 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 les trois plus importantes : le volume limité de gravillon, l'emploi de superplastifiants et l'utilisation d'une quantité importante d'addition ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$).

Nous remarquons aussi l'importance donnée à la comparaison entre les propriétés mécaniques des bétons autoplaçants et des bétons vibrés. Par ailleurs, il n'y a que peu d'informations sur l'effet du type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique des BAP. Or, vu le volume conséquent de l'ajout minéral, il semble nécessaire de donner une perspective particulière à ce sujet et valoriser d'autres matériaux en tant que substituts partiels au ciment en l'occurrence la vase calcinée issue des sédiments de dragage des barrages.



CHAPITRE 2

LA DURABILITE DES BETONS

CHAPITRE 2 : LA DURABILITE DES BETONS

I.1. INTRODUCTION

Avec les caractéristiques mécaniques présentées dans le chapitre précédent, les propriétés de durabilité des bétons sont aussi d'une importance capitale. En effet, bien que la résistance mécanique ait été choisie comme critère d'équivalence entre les divers bétons, l'objectif de cette étude concerne l'estimation de la durabilité des bétons autoplaçants.

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 prévues 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'intérieur du matériau solide [59].

I.2. FACTEURS INFLUENÇANT LA DURABILITE

La 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 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 mécaniques 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 autoplaçants, 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 auréoles de transition (interfaces pâte – granulats, zone plus poreuse avec des pores plus gros). En ce qui concerne la densité du réseau de bulles d'air, celle-ci dépend de l'utilisation ou non d'un entraîneur d'air spécifique mais également de l'effet entraîneur d'air du superplastifiant et/ou de l'agent de viscosité utilisés. La durée de malaxage est également un facteur important : un malaxage prolongé peut multiplier par deux le volume d'air occlus.

I.3. LES ATTAQUES CHIMIQUES DES BETONS

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 [59]. Parmi une multitude de causes de dégradation des matériaux cimentaires, figurent les attaques par les acides, par les sulfates et par le dioxyde de carbone.

I.3.1. Actions des acides

Les environnements agressifs du point de vue de la lixiviation et des attaques acides peuvent être assez variés, et combinés à d'autres types d'agressions. Mais les eaux en contact avec le béton ont en commun d'être faiblement minéralisées, en particulier en calcium, et neutres (pH = 7) voire acides (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^- [60]. Leur transport vers le milieu extérieur est donc diffusif, ce qu'ont permis de confirmer les modélisations du phénomène [61] [62].

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 [60] [63] [61] [64].

I.3.1.1. Sources des acides :

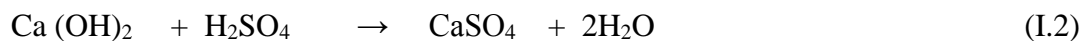
Les milieux acides les plus fréquents sont :

- 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 la dégradation de la surface exposée du béton.

1.3.1.2. Mécanisme d'attaque

En général, on peut établir qu'un acide est d'autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles.

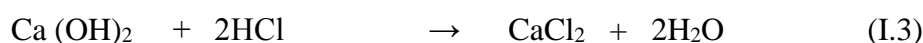
L'acide sulfurique (formule I.2) est relativement inoffensif, car les sulfates de calcium sont difficilement solubles dans l'eau. Mais les ions de sulfate jouent en l'occurrence un rôle nuisible pour le béton (gonflement dû aux sulfates).



Hydroxyde de calcium + acide sulfurique → sulfate de calcium + eau

L'acide sulfurique réagit donc 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 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) moins soluble dans l'eau.

L'acide chlorhydrique fait partie des substances très agressives, car le sel correspondant (chlorure de calcium) est très facilement soluble dans l'eau. La formule I.3 décrit la réaction entre l'acide chloridrique et la portlandite.



Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique → chlorure de calcium + 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) [24].

1.3.1.3. Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques acides

Les liants pauvres en CaO sont souvent préconisés car ils interviennent à deux niveaux dans le mécanisme de lixiviation et de l'attaque acide. D'une part, ils génèrent une teneur plus faible en portlandite dont la dissolution engendre une augmentation de la porosité et des CSH plus denses et stables. D'autre part, à porosité globale identique, la morphologie du réseau poreux serait différente, et globalement cela se traduirait par une porosité capillaire et des coefficients de diffusion plus faibles [65]. Ainsi les liants comprenant des additions pouzzolaniques telles que les fumées de silice ou les cendres volantes font preuve d'une meilleure résistance à la lixiviation et aux attaques acides [63] [66]. La littérature est riche en résultats sur l'effet des ajouts minéraux sur la résistance des matériaux cimentaires dans les milieux acides, nous citons à titre d'exemple quelques travaux essentiels :

Kostuch et al [67] ont montré qu'en substituant 10% de métakaolin la résistance aux attaques acides est augmentée. Il associe ce phénomène à deux paramètres qu'induit la substitution de métakaolin dans la matrice cimentaire :

- Le métakaolin diminue le coefficient de transfert donc l'avancée de la solution acide.
- La réaction pouzzolanique transforme la Portlandite en CSH qui ont un coefficient de solubilité plus bas et donc améliore la résistance du béton envers ces attaques.

Enfin, d'après Roy [68], la résistance aux attaques acides des liants avec métakaolin augmente avec le taux de substitution. La perte de masse diminue de 4,5 % à 2 % lorsque le taux de substitution augmente de 7,5 à 22,5 %.

Rahmani et Ramzaniyanpour [69] ont suivi la perte de masse des mortiers et bétons soumis à l'attaque de l'acide sulfurique. Leurs résultats (Figure I.15), après 6 mois d'immersion, montrent une perte de masse de 62,6 % pour le béton à base de filler (C2), de 56,6 % pour l'addition binaire filler + fumée de silice (C3) de 30,1 % pour le filler + pouzzolane naturelle (C4) et de 40,2 % pour l'addition binaire filler + fines de pierre ponce (C5). Pour les bétons témoins (C1), la perte de masse était plus importante, cependant l'addition binaire filler + pouzzolane naturelle (C4) conserve sa meilleure résistance dans un environnement d'acide sulfurique.

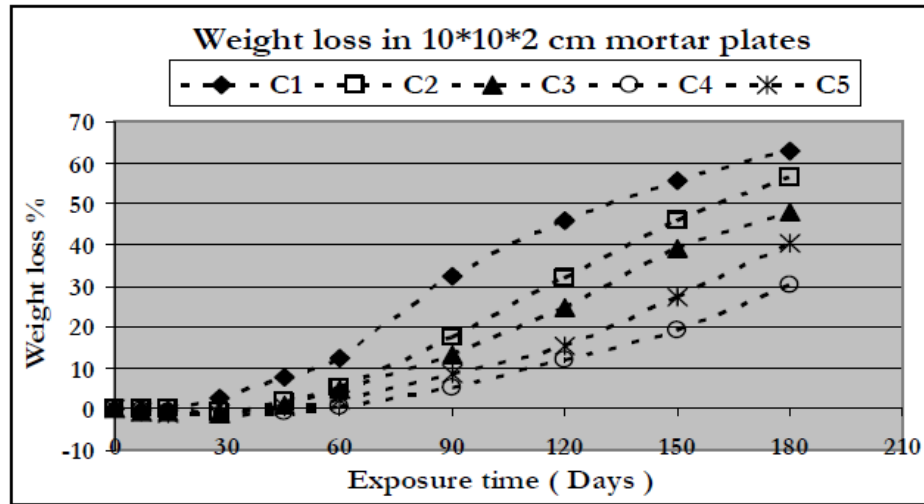


Figure I. 15 : Perte de masse en fonction de temps d'immersion dans l'acide sulfurique [69]

Ghrici et al. [70] ont trouvé que le filler calcaire présente une meilleure résistance dans la solution d'acide sulfurique que celle avec de l'addition pouzzolane naturelle et l'addition binaire pouzzolane naturelle + filler calcaire. Cependant dans la solution d'acide chlorhydrique le béton à base de pouzzolane naturelle présente une faible perte de masse.

Tamimi [71] a remarqué que la substitution de ciment par 50 % de cendre volante est très bénéfique en terme de résistance des bétons à haute performance vis-à-vis de l'acide sulfurique et de l'acide chlorhydrique. Avec 60 %, l'effet positif de cendre volante diminue et la perte de masse augmente.

D'après les travaux de Rackel [52] (Figure I.16), les pâtes avec métakaolin sont moins résistantes à l'attaque vis-à-vis de l'acide citrique que celle avec 100% de CEMI

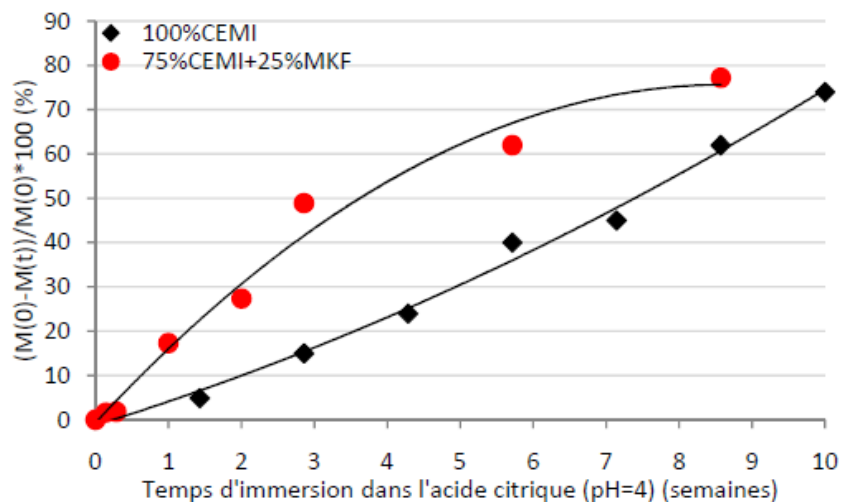


Figure I.16 : Cinétique de dégradation des pâtes en immersion dans l'acide citrique [52]

D'un point de vue des attaques à l'acide citrique, les matrices avec métakaolin sont, d'après les résultats, moins résistante [52]. La seule hypothèse pour expliquer ce phénomène est la pression des sels d'acide citrique. Les sels se formant dans les pores de la matrice, exercent une pression capable de la fissurer.

Comme les pores sont plus fins dans les matrices avec métakaolins la matrice subit plus rapidement cette pression, ce qui accélère la ruine des éprouvettes, comparée à celles avec 100% de CEMI.

I.3.2. Actions des sulfates

Les ions sulfates sont présents de façon naturelle dans certains sols et eaux souterraines. Les attaques sulfatiques sont dites externes quand les ions sulfates proviennent de l'environnement. Ainsi, ce type de dégradation est considéré comme une action environnementale, dans la définition des classes d'exposition – XA, environnements chimiquement agressifs [64].

L'attaque sulfatique externe est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les CSH ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide, ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée.

I.3.2.1 Source des sulfates

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollutions domestiques et industrielles. Dans certaines régions (comme l'Afrique du nord, les prairies canadiennes, ..) où les sols contiennent du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou de l'anhydrite (CaSO_4), on peut en rencontrer des concentrations élevées supérieur à 5%.

En région parisienne ces concentrations sont d'environ : 58g/l pour le Na_2SO_4 , 194g/l pour le $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, 440g/l pour $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ et de 2,1g/l pour le CaSO_4 .

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 de l'humidité avec la 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:

- Contamination des granulats par du plâtre
- Granulats gypseux
- Sulfures dans certains granulats

1.3.2.2. Mécanisme d'attaque

Des roches et des minéraux naturels provenant des sulfates de calcium (gypse $\text{CaSOB}_{4\text{B}} \cdot 2\text{HB}_{2\text{B}}\text{O}$ et anhydrite $\text{CaSOB}_{4\text{B}}$), et des sulfates de magnésium (epsomite $\text{MgSOB}_{4\text{B}} \cdot 2\text{HB}_{2\text{B}}\text{O}$) 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 [72] :

- **Formation du gypse secondaire** (formule I.4) :



NaOH : Alcalinité élevée \rightarrow stabilisation des CSH.

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté. Dans la majorité des cas, il n'y a 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 [73].

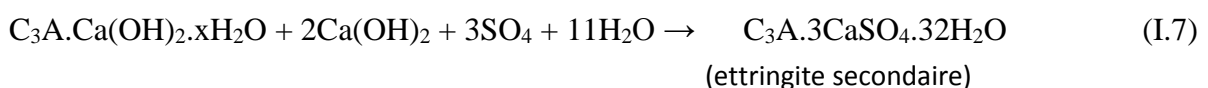
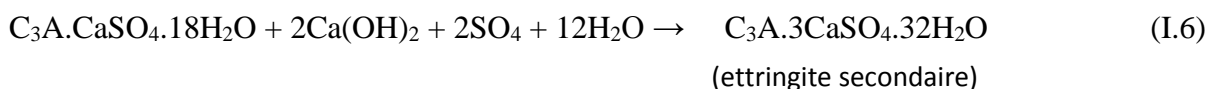
- **Formation d'ettringite secondaire :**

a) À partir du C_3A anhydre résiduel (formule I.5) :



(ettringite secondaire)

b) À partir des aluminates hydratés (formules I.6 et I.7) :



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 supérieur au volume du solide initial.

La figure I.17 schématise le mécanisme proposé par Santhanam et al [74] dans le cas de l'attaque par les sulfates de sodium. L'étape 1 décrit l'état initial du processus. Dans le cas d'une solution à bas pH (6-8), le temps du déclenchement de l'expansion est réduit [75] [76]. Toutefois, le taux d'expansion après cette initiation (au cours de l'étape 2), n'est pas différente lorsque le pH est faible [76]. Dans l'étape 2, le gypse et l'ettringite commencent à se former à la surface. Ainsi, comme il est décrit dans l'étape 3, une force de compression résultante est produite à la surface. Des fissures à l'intérieur du mortier sont provoquées (étape 4) avec un dépôt de produits au niveau des fissures et même dans la pâte. Le gypse se dépose dans les fissures et dans les vides parce que ceux-ci fournissent les meilleurs sites de nucléation. Il existe trois zones distinctes dans le mortier : zone de surface désintégrée, la zone de dépôt des produits d'attaque, et à l'intérieur la zone de fissures qui est chimiquement inchangée.

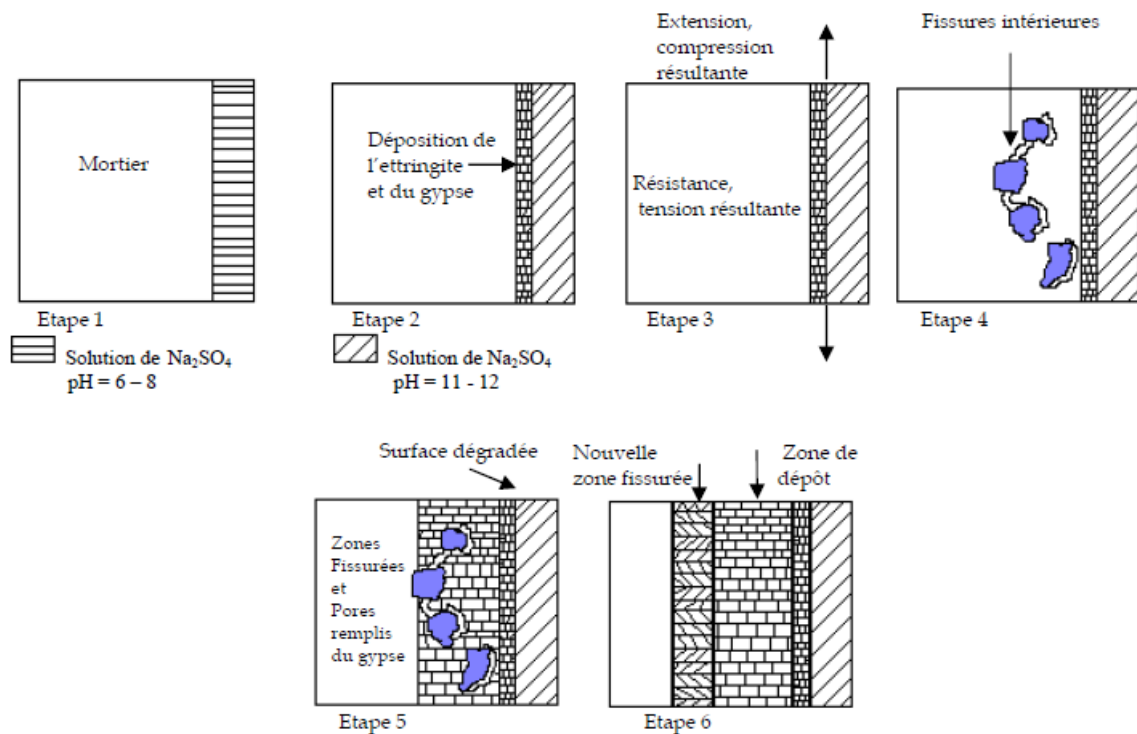


Figure I.17. Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de sodium [74]

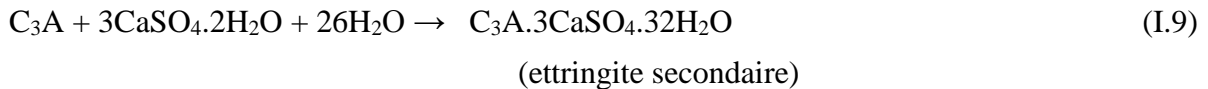
Les mécanismes de dégradation sont dépendant également de la nature du cation (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} ...etc.) qui est associée aux ions sulfates dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment. Le sulfate de magnésium est très agressif par rapport au sulfate de sodium [77].

Le sulfate de magnésium réagit par double action (formules I.8, I.9 et I.10):

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 CSH :



(C,Mg)-S-H : gel faiblement cohésif.

Le mécanisme proposé dans le cas de l'attaque par les sulfates de magnésium est schématisé dans la figure I.18. Une couche de brucite (hydroxyde de magnésium Mg(OH)_2) se forme rapidement sur la surface de l'échantillon en raison de la réaction de la portlandite Ca(OH)_2 avec la solution. La couche de brucite est souvent complétée par une couche de gypse qui se forme à la suite de la même réaction à l'intérieur de la couche de brucite d'où une augmentation du taux d'expansion [78]. Une fois que les canaux d'écoulement sont établis à travers la surface de la couche de brucite, une attaque directe des CSH peut se produire. À la suite de cette attaque, la formation de MSH et de gypse secondaire aura lieu (étape 4). La détérioration finale du mortier est la conséquence de la perte de résistance du fait de la transformation de la pâte en MSH.

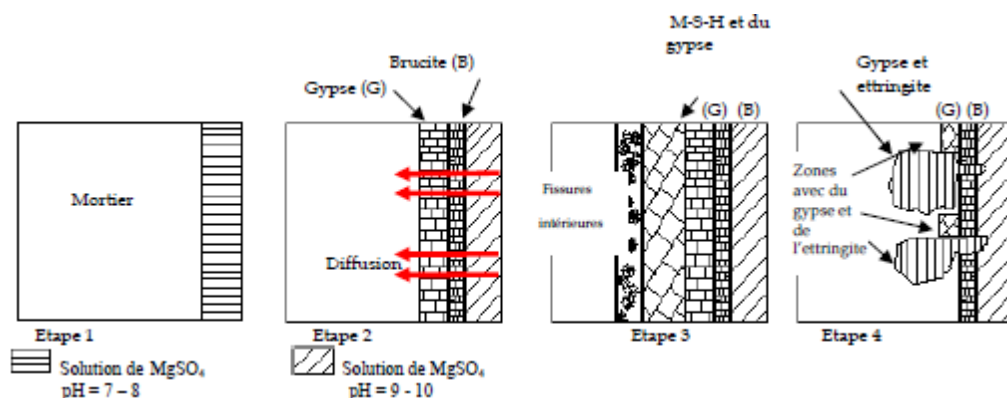


Figure I.18 : Mécanismes proposés pour l'attaque aux sulfates de magnésium [78]

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 CSH. Le silicate de magnésium hydraté (MSH) ainsi formé n'a pas de propriétés liantes, et par conséquent, la pâte hydratée devient molle et incohérente [79].

I.3.2.3. Influence des ajouts minéraux sur la résistance des bétons aux attaques sulfatiques

Dans une étude de la résistance du béton autoplaçant à l'attaque par des sulfates [56], l'accroissement du gain de masse avec la diminution de la classe de résistance et l'augmentation du rapport Eau/Liant équivalent, a été constaté. 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 [80] (figure I.19).

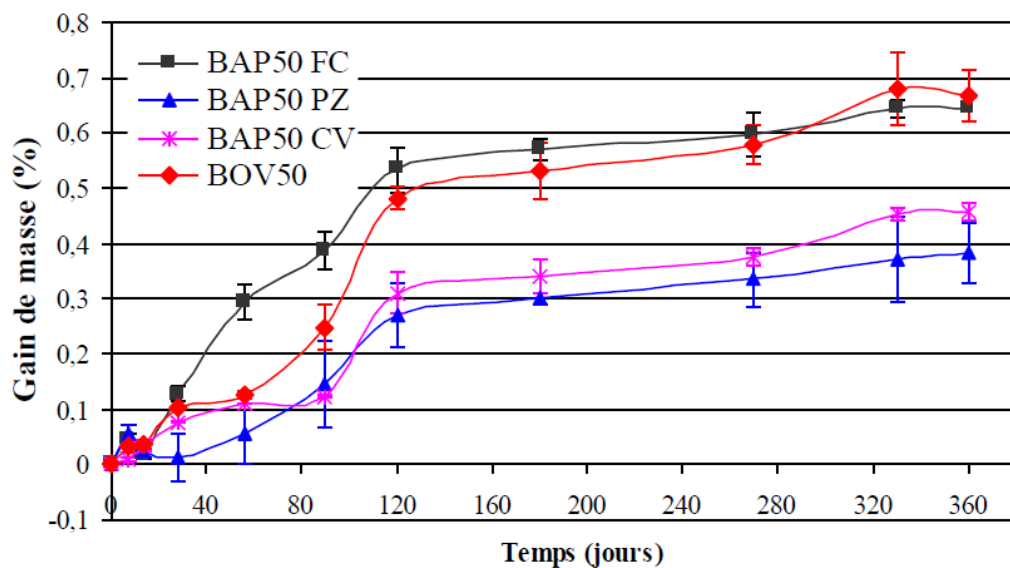


Figure I.19: variation de la masse des échantillons immergés dans la solution du sulfate de sodium (bétons de classe 50 MPa) [80].

Les résultats des BOV et BAP (à base de pouzzolane PZ, de cendres volantes CV et de fillers calcaires FC) 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 prenant 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.

D'autre part, la présence d'une forte concentration en Al_2O_3 dans le système permet aussi de contrecarrer la formation d'ettringite. Ceci est confirmé par les études de Ramlochan et al. [81] qui observent que les matériaux pouzzolaniques tels que les métakaolins, les cendres volantes et la fumée de silice, diminuent le phénomène d'expansion lié à la formation d'ettringite différée, mais aussi retardent l'initiation de cette expansion en ralentissent sa cinétique.

Rackel [52] a testé l'effet des attaques sulfatiques externes sur les bétons d'ouvrage d'art (BOA) formulés avec 100% de CEMI et 75%CEMI+25% de MKF, selon le mode opératoire non normalisé développé par Messad [82]. La Figure I.20 présente les résultats des suivis de l'expansion unidirectionnelle des éprouvettes de béton en fonction du temps d'immersion dans une solution de sulfate de sodium de concentration 6g/l de SO_4 maintenue à 25°C et pH 7.

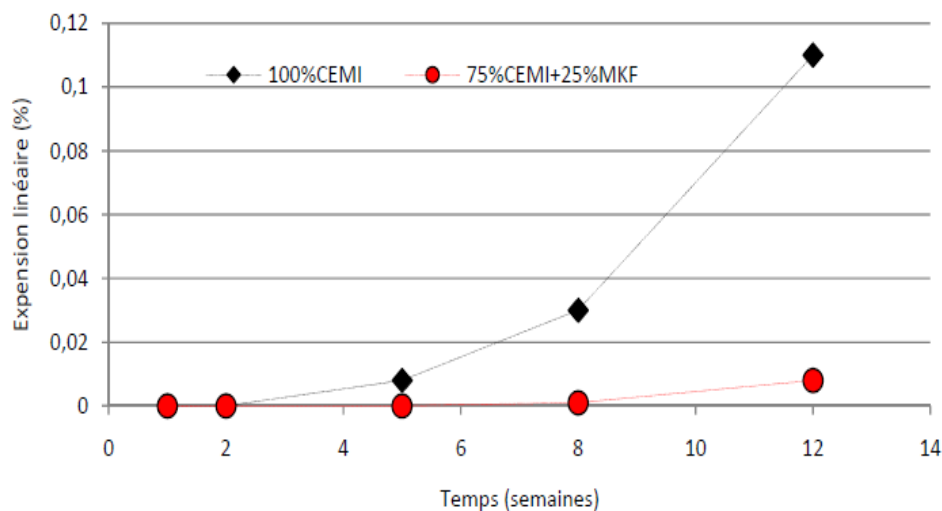


Figure I.20 : Expansions linéaires mesurées sur des éprouvettes de bétons d'ouvrages d'art (BOA) avec ou sans métakaolin flash [52]

L'expansion du béton testé diminue très fortement lorsque 25% du CEMI de métakaolin flash est substitué. Ainsi après 12 semaines de test, l'expansion du béton avec MKF est inférieure à 0.01% alors que celle du béton témoin dépasse 0.1%.

Rackel [52] a vu que lorsque le métakaolin flash est présent dans la matrice cimentaire le pH diminuait légèrement pour atteindre 12, ce pH étant celui de la dissolution de l'ettringite

secondaire. Grâce à cette légère diminution, si une quantité d'ettringite secondaire se formait, elle ne serait pas stable à un tel pH, et pourrait donc de nouveau se dissoudre.

Il a aussi mesuré les résistances en compression des bétons avant et après les 12 semaines de vieillissement accéléré (Tableau I.1). L'attaque sulfatique induit une perte de résistance mécanique plus grande pour le béton témoin que pour celui contenant 25% de MKF en substitution, 9% pour le béton témoin contre 4.4% pour le béton avec MKF

Résistances (MPa)	100%CEMI	75%CEMI+25%MKF
à 28 jours	50.1	52.4
après 12 semaines d'essai	45.6	50.1
Perte relative en %	9.0	4.4

Tableau I.1 : Résultats de résistance en compression à 28 jours et en fin d'essai de vieillissement accéléré pour les bétons d'ouvrage d'art testés [52]

Il a donc conclut [52], autant au niveau de l'expansion de la profondeur dégradée que de la résistance mécanique, que le métakaolin flash augmente la durabilité des bétons vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe.

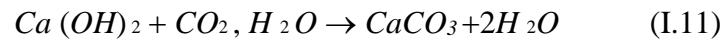
I.3.3. La carbonatation

I.3.3.1. Les mécanismes de carbonatation

La carbonatation atmosphérique repose sur l'action du gaz carbonique CO_2 de l'atmosphère qui se diffuse à travers le réseau poreux ou fissural du béton et se dissout en acide au contact de la solution interstitielle. Cette acidification du milieu induit une dissolution de la portlandite qui constitue la réserve de basicité du béton. Au contact de la solution interstitielle, le gaz carbonique CO_2 provoque une réaction chimique avec la pâte de ciment hydratée. Cette réaction transforme les produits d'hydratation, comme la portlandite $Ca(OH)_2$ et les CSH , en carbonates de calcium $CaCO_3$.

La carbonatation entraîne une baisse du pH (initialement entre 12,5 et 13,5) dans la solution interstitielle du béton jusqu'aux environs de 9. La solution interstitielle perd sa capacité protectrice envers les armatures subissant alors une initiation de la corrosion (Figure I.21)

Dans le cadre d'une approche simplifiée, le mécanisme réactionnel de carbonatation de $Ca(OH)_2$ [83] [84] [85] [86] est synthétisé par la réaction chimique hétérogène suivante (formules I.11) :



Cette équation indique que la carbonatation de la portlandite s'accompagne globalement d'une libération de l'eau de structure.

Les grandeurs qui peuvent permettre de caractériser l'évolution de la réaction, en fonction du temps ou de la profondeur de pénétration, sont la concentration en portlandite $Ca(OH)_2$ et le pH de la solution interstitielle du béton. La figure I.21 illustre l'intervention combinée des trois phases gazeuse, aqueuse et solide, au cours du processus de carbonatation de la portlandite. La carbonatation est donc maximale lorsque l'humidité relative a une valeur modérée, c'est-à-dire lorsqu'elle est comprise entre 40 et 60 %, ou entre 40 et 80 % [87] [88], voire entre 84 et 92 % [89]. Ce domaine correspond en moyenne à quelques couches de molécules d'eau adsorbées sur la surface du solide [90] [91]. La carbonatation ne se produit donc pas dans un béton totalement sec ou complètement saturé en eau.

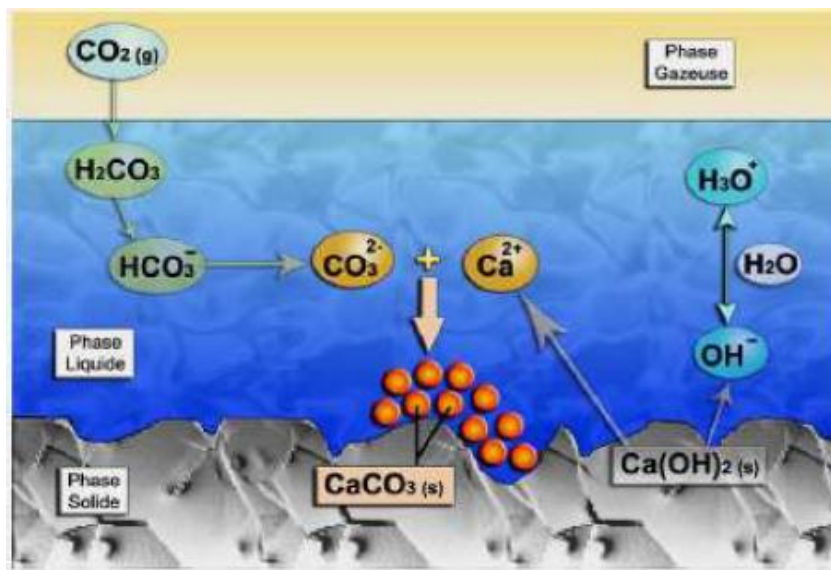


Figure I.21. Mécanisme de carbonatation de $Ca(OH)_2$ [86]

Effets des ajouts minéraux sur la carbonatation des bétons

D'après les données de la littérature, on peut remarquer que l'effet du type d'addition minérale sur la carbonatation des BAP est très peu étudié. Toutefois, les travaux dans ce domaine se concentrent sur la comparaison entre BAP et BOV de même classe de résistance, et là aussi les BAP sont formulés généralement avec la même addition minérale (filler calcaire). On peut citer plusieurs travaux sur la comparaison entre des BAP à base de filler calcaire et des BOV [93] [94] [95]. Ces travaux montrent qu'en général, les BAP composés à

partir d'un ajout de filler calcaire présentent une légère vulnérabilité par rapport aux BOV, mais l'écart n'est pas important entre les valeurs de profondeurs de carbonatation de ces deux types de béton (Figure I.22).

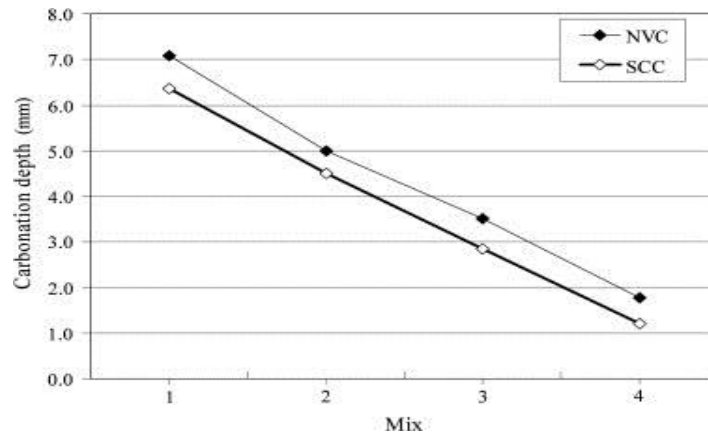


Figure I.22: Profondeur de carbonatation après 9 mois [95]

Les premiers résultats faisant état d'une comparaison entre des BAP avec trois différents types d'additions minérales (filler siliceux (SCC8), filler calcaire (SCC1) et cendre volante (SCC9)) indiquent qu'il semble ne pas y avoir de différence notable entre leurs cinétiques de carbonatation [96] [Tableau I.2]. Selon ces auteurs l'incorporation de la cendre volante n'a pas un effet remarqué sur l'amélioration de la résistance des BAP vis-à-vis de la carbonatation. L'utilisation des cendres volantes donne une structure plus dense, mais en même temps une partie de CaOH_2 est consommée par l'hydratation de la cendre volante, ce qui conduit à une profondeur de pénétration élevée.

Dinakar et al. [96] ont étudié l'influence des différents pourcentages (de 0, 10, 30, 50, 70 et 85%) de cendre volante sur la carbonatation des BAP. Ils ont trouvé que la profondeur de carbonatation augmente avec l'augmentation de la quantité de cendre volante, cela est valable surtout pour les BAP ayant de faibles et moyennes résistances.

	A [mm/ $\sqrt{\text{year}}$]	N
SCC1	14.4	5
SCC2	10.9	5
SCC3	23.3	3
SCC4	14.6	5
SCC5	23.0	5
SCC6	11.0	5
SCC7	7.5	8
SCC8	14.1	5
SCC9	14.2	5
SCC10	11.1	6
SCC11	16.6	6
SCC12	17.6	3
SCC13	12.0	6
SCC14	31.2	6
SCC15	32.2	3
SCC16	7.5	3
TC1	11.5	5
TC2	25.7	3
TC3	3.7	5
TC4	4.2	5

Tableau I.2: Valeur de la profondeur de carbonatation [96]

L'introduction de métakaolin dans la matrice cimentaire a une influence différente selon la nature du béton :

- Si le béton étudié est un béton compact ($E/C < 0.3$), comme ceux de Rougeau et al. [97], il y aura diminution, voir absence de carbonatation de la matrice cimentaire ;
- Si le béton étudié est un béton courant, la présence de métakaolin dans le béton accélèrera le front d'avancement de la carbonatation.

Plus la teneur en Portlandite est faible dans le matériau, plus le front d'avancement du dioxyde de carbone dans la matrice se fait rapidement comme dans le cas des matrices avec du métakaolin ou de fumées de silice selon Rackel [52].

Ce dernier [52] a effectué une comparaison entre des BAP témoins (100% de CEMI) et des BAP avec 75% de CEMI et 25% de métakaolin (Figure I.23). Il a choisi de représenter l'évolution de la carbonatation en fonction du temps.

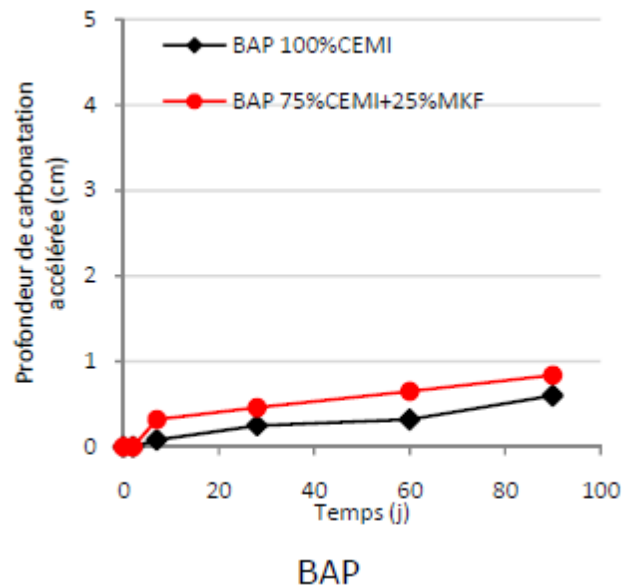


Figure I.23 : Evolutions des profondeurs de carbonatation accélérée au cours du temps [52].

Les résultats de carbonatation accélérée révèlent que plus la résistance des bétons augmente plus la profondeur de carbonatation diminue. Cette grandeur est donc liée à la compacité du béton. A résistance similaire, les bétons avec métakaolin présentent une profondeur de carbonatation plus élevée que celles des bétons témoins avec 100% de CEMI [52].

I.4. 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 substitut (dans le cas des ciments composés) utilisé dans la pâte de ciment et les propriétés de 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 substituts 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 substituts de ciment sur la durabilité des BAP. C'est le cas de la vase provenant des barrages et ayant subi une calcination pour la rendre active.



CHAPITRE 3 :

***LA VALORISATION DE LA VASE
ET LA POUZZOLANE DANS LES
BETONS AUTOPLAÇANTS***

CHAPITRE 3 : LA VALORISATION DE LA VASE ET LA POUZZOLANE DANS LES BETONS AUTOPLAÇANTS

I.1. INTRODUCTION

L'Algérie comme plusieurs pays dans le monde est touchée par le phénomène d'envasement qui prend de l'ampleur. Elle entreprend chaque année des travaux gigantesques de dévasement où plusieurs millions de mètres cubes de produits sont dragués. Ces produits de dragage constituent potentiellement une ressource des plus intéressantes. Leur utilisation en tant que substitut partiel au ciment dans la formulation des matériaux cimentaire est préconisée après traitement thermique (calcination) afin de les rendre réactifs et obtenir ainsi une pouzzolane artificielle que l'on pourra comparer à la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (ouest algérien).

Bien que la thématique de valorisation des sédiments soit encore dans ses débuts, de nombreux travaux de recherches se sont développés ou sont en cours de préparation. En effet ces produits constituent une ressource précieuse et immense et ne devrait pas être considérés comme des déchets.

Le présent chapitre s'attache à décrire le phénomène d'envasement des barrages algériens notamment les deux barrages concernés par la présente étude en l'occurrence les barrages de Fergoug et Chorfa (ouest algérien). Il décrit également les divers modes de valorisation possibles des sédiments issus des opérations de dévasement de ces barrages.

I.2. PHENOMENE DE L'ENVASEMENT

Le potentiel hydraulique perd annuellement environ 20 millions de mètres cubes à cause du phénomène d'envasement par le dépôt des sédiments dans les retenues selon Remini [98]. Cette quantité est énorme pour certains barrages dont la sédimentation annuelle peut représenter des valeurs de l'ordre de 6% du volume total [98].

Par définition l'envasement des retenues est connu comme étant l'accumulation des dépôts de solides transportés au fond des retenues. Les dommages causés par ce phénomène (réduction de la capacité utile, obturation des pertuis de vidange) peuvent être importants, comme, il peut s'avérer extrêmement difficile, voire même impossible d'y remédier particulièrement dans les régions arides et semi arides.

Outre le problème de la diminution de la capacité du réservoir, l'envasement pose un problème de la stabilité des ouvrages [98].

I.2.1. Envasement en quelques chiffres

Dans le tableau ci-dessous, sont donnés les taux d'envasement des différents barrages en Algérie.

N°	Barrage	Wilaya	Capacité initiale Hm ³	Capacité (dernier levé) Hm ³	Envasement annuel Hm ³ /an
01	Meurad	Tipaza	0.30	0.25	0.005
02	Oued-Fodda	Chlef	228.00	102.85	2.66
03	Boughzoul	Medea	55.00	20.27	0.66
04	Hamiz	Boumerdes	21.00	15.53	0.35
05	Ghrib	Ain-defla	280.00	115.32	3.20
06	Foum.-El-Gueiss	Khenchla	3.00	0.43	0.03
07	Bouhanifia	Mascara	73.00	38.11	0.78
08	Foum.-El-gherza	Biskra	47.00	14.89	0.80
09	Beni-bahdel	Tlemcen	63.00	54.63	0.20
10	Sarno	S.B.Abbes	22.00	21.25	0.12
11	Bakhadda	Tiaret	56.00	39.94	0.27
12	Ksob	M'sila	29.50	12.34	0.30
13	Zardezas	Skikda	31.00	18.68	0.40
14	Meffrouch	Tlemcen	15.00	14.99	0.12
15	Cheffia	El-taref	171.00	158.83	0.17
16	D.torba	Bechar	350.00	260.25	1.30
17	Fergoug	Mascara	18.00	3.12	1.50
18	S.m.b.a	Relizane	235.00	153.71	1.00
19	Derdeur	Ain-defla	115.00	105.12	0.83
20	Harreza	Ain-defla	70.00	76.65	0.28
21	Merdja.s.a	Relizane	54.90	47.97	0.59
22	Guenitra	Skikda	125.00	117.82	0.13
23	Ouzert	Mascara	100.00	93.91	0.30
24	Keddara	Boumerdes	145.60	142.39	0.05
25	Sidi-Yacoub	Chlef	280.00	252.85	0.17
26	Lekhal	Bouira	30.00	27.16	0.17
27	Bou Roumi	Blida	188.00	181.86	0.80
28	Ain-Zada	Borj.B.A	125.00	121.40	0.50
29	H.grouz	Mila	45.00	40.15	0.40
30	Ain-Dalia	S.Ahras	82.00	76.08	0.75

31	Dahmouni	Tiaret	41.00	39.52	0.40
32	Hamam Debag	Guelma	200.00	184.35	0.53
33	Beni-Amrane	Boumerdes	16.00	11.85	4.10
34	Gargar	Relizane	450.00	358.28	4.50
35	Sidi-Abdelli	Temcen	110.00	106.61	0.18
36	Harbil	Medea	1.00		
37	Ladrat	Media	10.00	8.47	0.02
38	C.Bougara	Tissemsilt	13.00	11.32	0.30
39	Chorfa	Mascara	82.00	70.21	0.36
40	Boukourdane	Tipaza	97.00	105.00	0.36
41	Beni-Zid	Skikda	40.00	39.39	0.52
42	Babar	Khenchla	41.00	38.01	0.68
43	Oued-Cherf	S.Ahras	157.00	152.65	0.52
44	Mexa	El-Taref	47.00	30.27	0.11
45	H.Boughrara	Tlemcen	177.00	175.45	0.43
46	Brezina	El Bayadh	122.50	108.47	1.20
47	F.D.gazelles	Biskra	55.50	54.74	0.30
48	Zit Emba	Skikda	117.39	116.59	0.24
49	Taksebt	Tizi-Ouzou	175.00	181.02	0.26
50	El-Agrem	Jijel	33.90	33.04	0.09
51	Beni-Haroun	Mila	960.00	960.00	0.00
52	k.medouar	Batna	69.10	74.32	0.02
53	O.Mellouk	Ain-Defla	127.00	127.00	1.40
55	Sikkak	Tlemcen	27.00	27.00	0.11
56	Tilesdit	Bouira	167.00	167.00	0.69
57	Koudiart rosfa	Tissemsilt	75.00	75.00	1.15
58	Kramis	Mostaganem	45.38	45.38	0.55
59	s.m.Ben Talba	Ain-Defla	75.00	75.00	0.40
60	t.nador	Tipaza			
61	Tchy-Haf	Bedjaia	80.00	61.80	4.70
62	T.chiffa	Medea			
63	Bougous	El-Taref	120.00	120.00	
64	Kissir	Jijel	68.00	68.00	0.15
65	k.Acerdoune	Bouira	640.00	640.00	4.00
66	Boussiaba	Jijel	120.00	120.00	0.35
67	Kerrada	Mostaganem	70.00	70.00	

Tableau I.3 : Quelques barrages envasés en Algérie ANBT [99]

Le tableau montre la forte variation de l'envasement d'un barrage à l'autre où on trouve que la quantité des sédiments déposée en 2011 est de 970 hm³, soit un taux de comblement de 12% de la capacité totale de 7,78x10³ hm³ (Figure I.24) et un taux d'envasement annuel de 52.94 hm³/an, dont le barrage qui a un taux d'envasement élevé est celui de Tchy-Haf situé à Bedjaïa, suivi par celui de Gargar à Relizane et Beni-Amrane à Boumèrdes etc..., (Figure I.25).

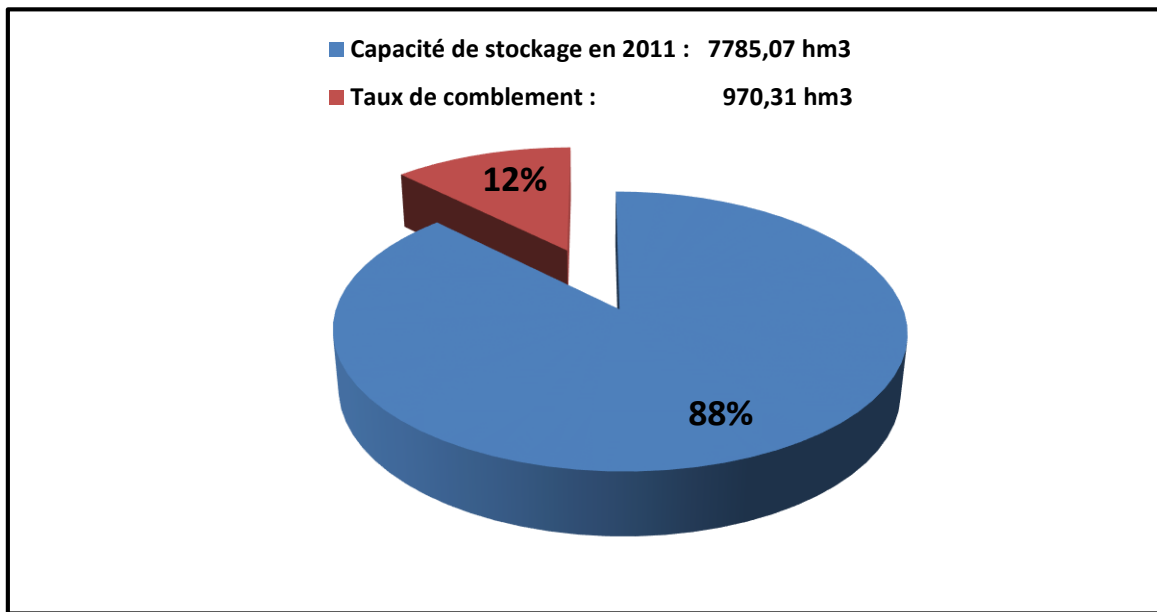


Figure I.24: Le taux de comblement par rapport à la capacité totale des barrages Algériens.

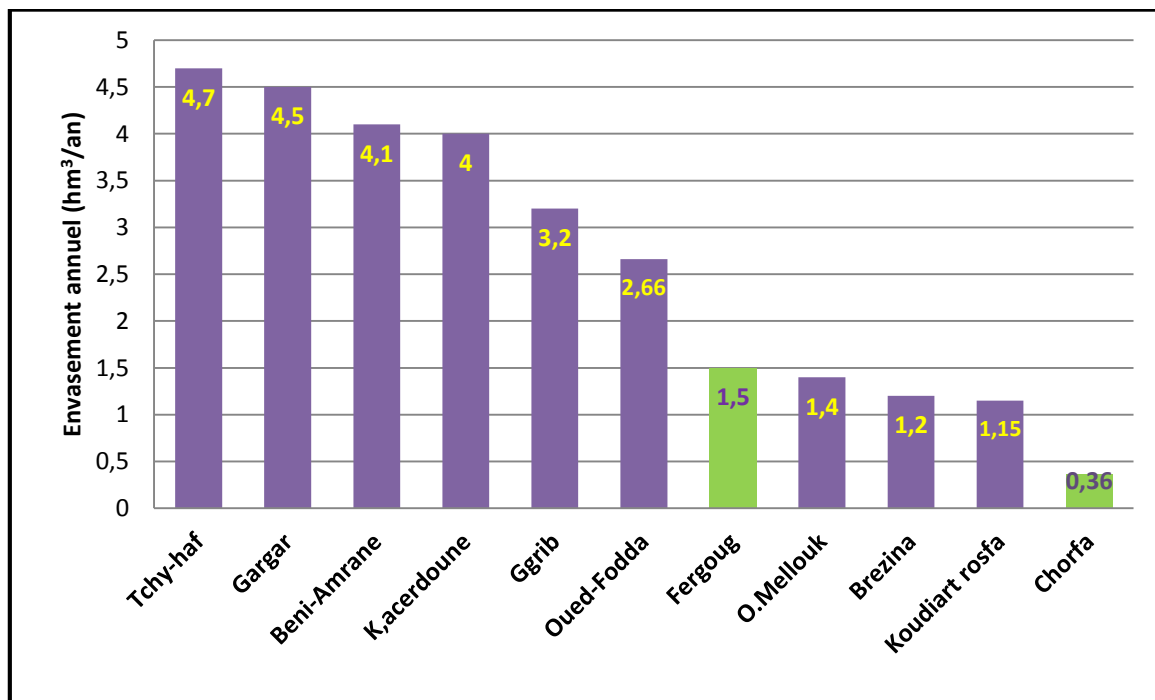


Figure I.25: L'envasement annuel de quelques barrages Algériens.

L'envasement des barrages algériens constitue actuellement une préoccupation essentielle qui met les services de mobilisation des ressources hydrauliques devant des difficultés supplémentaires du fait que les procédés de lutte contre l'envasement s'avèrent peu efficaces et onéreux.

I.2.2. Présentation du barrage de Fergoug

I.2.2.1. Situation et caractéristiques géologiques du site

Le barrage de Fergoug, est situé au nord-ouest de l'Algérie à environ 10 km au sud de la ville de Mohammedia (Perrégaux) sur la route de Mascara, et à 80 km de la wilaya d'Oran (Figure I.26). Il est construit dès l'installation des premiers colons dans cette région (1845) [100].

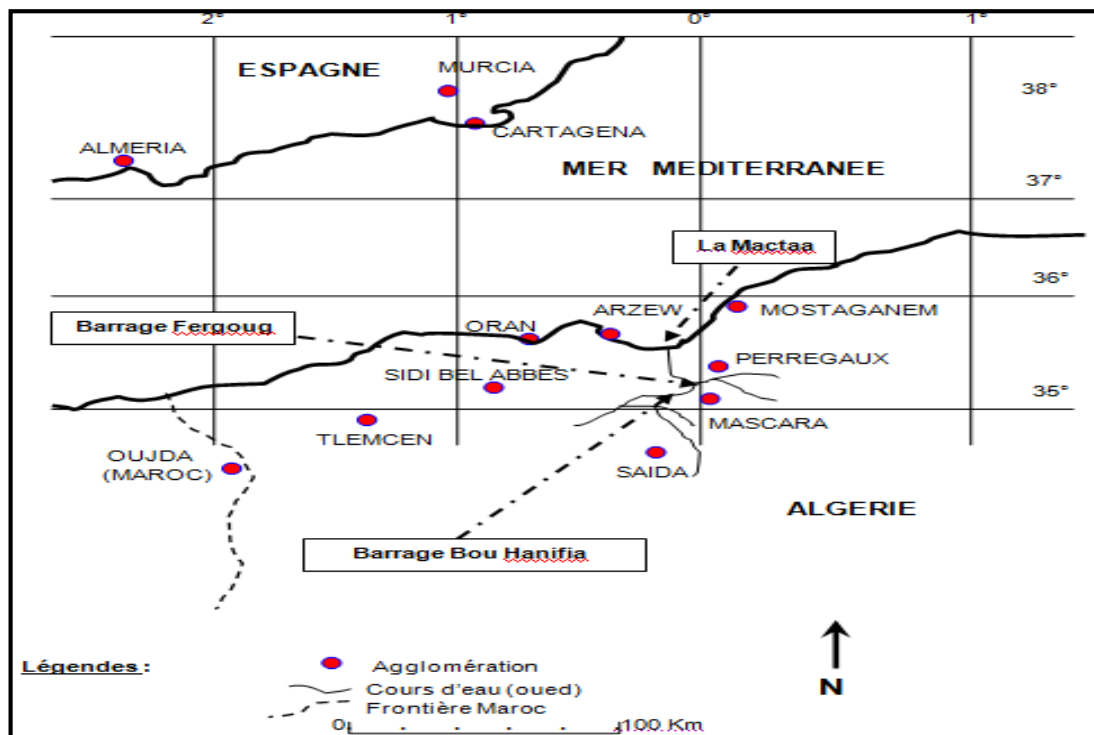


Figure I.26 : Situation géographique du barrage de Fergoug [101].

I.2.2.2. Le Bassin versant du barrage de Fergoug

Un bassin versant est l'ensemble des dénivellations du relief qui fusionnent en un système hydraulique unique délimitant un déversement superficiel [102].

Le barrage de Fergoug est alimenté principalement par Oued El Hammam (Figure I.27) [102].

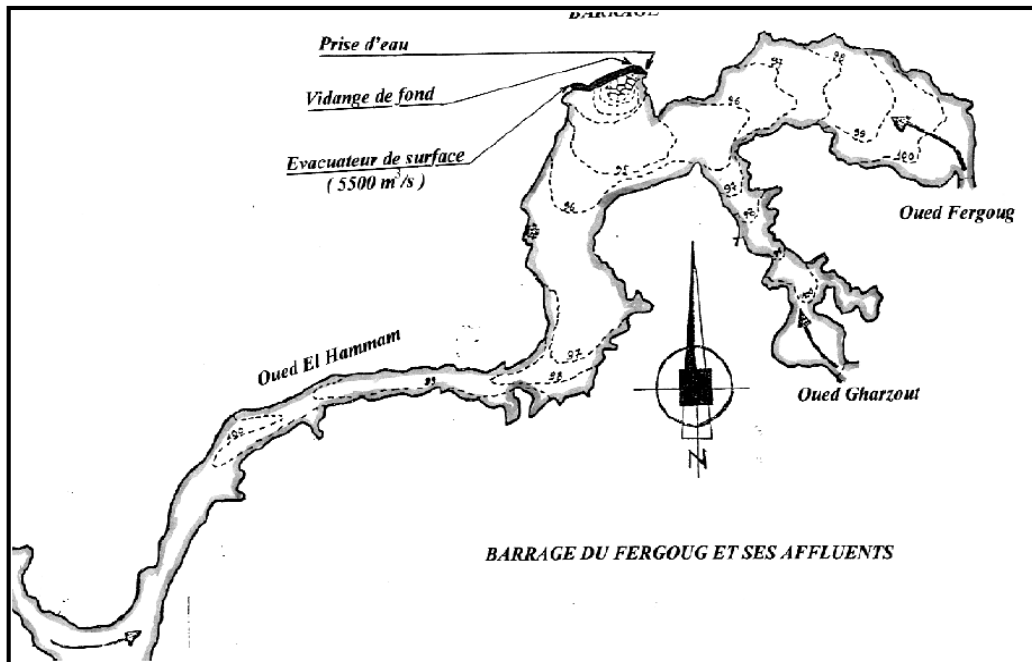


Figure I.27 : Le barrage du Fergoug, ses ouvrages annexes et ses affluents [102].

I.2.2.3. Situation actuelle du barrage

Dans son état actuel, le barrage présente un fort taux d'envasement. Sa capacité de stockage est estimée à 3,12 million de m³ suivant le levé bathymétrique de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) [99].

La poussée de végétaux dans la cuvette traduit la perte des profondeurs. Le barrage ne répond plus aux fonctions initiales pour lesquelles il fût conçu.

Les photographies suivantes donnent un aperçu réel de la situation actuelle du barrage de Fergoug (Figures I.28 et I.29) :



Figure I.28: Vue du barrage de Fergoug (2012).



Figure I.29: La digue et la cuvette envasée du barrage de Fergoug (2012).

De grands efforts ont été déployés pour la conservation du barrage de Fergoug, mais malheureusement, le site figure parmi les plus touchés par l'érosion et l'envasement.

Parmi ces efforts, des opérations de dragage étaient épisodiquement programmées, coûteuses mais indispensables.

Les matières draguées (vases) ont causées de nombreux dégâts à l'environnement. Le traitement et la valorisation de ces vases dans des procédés simples, permettra de ne plus les considérer comme déchets gênants, mais plutôt comme matières premières potentielles.

I.2.3. Présentation du barrage de Chorfa

Le barrage Chorfa (ainsi appelé après la réalisation de sa nouvelle digue) situé dans la Daira de Sig, à une quarantaine de kilomètres du chef-lieu de la wilaya de Mascara, de capacité initiale 82 Hm³, régularise les eaux du sous bassin de la Mekerra (Oued Mebtouh), et alimente les localités de Oued Mebtouh, Boudjehaha El-Bordj et Aïn Adden qui relèvent du territoire de la wilaya de Sidi Bel-Abbès. La production actuelle dépasse les 25 000 m³/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 [103].

La situation géographique du barrage de Chorfa est représentée dans la Figure I.30

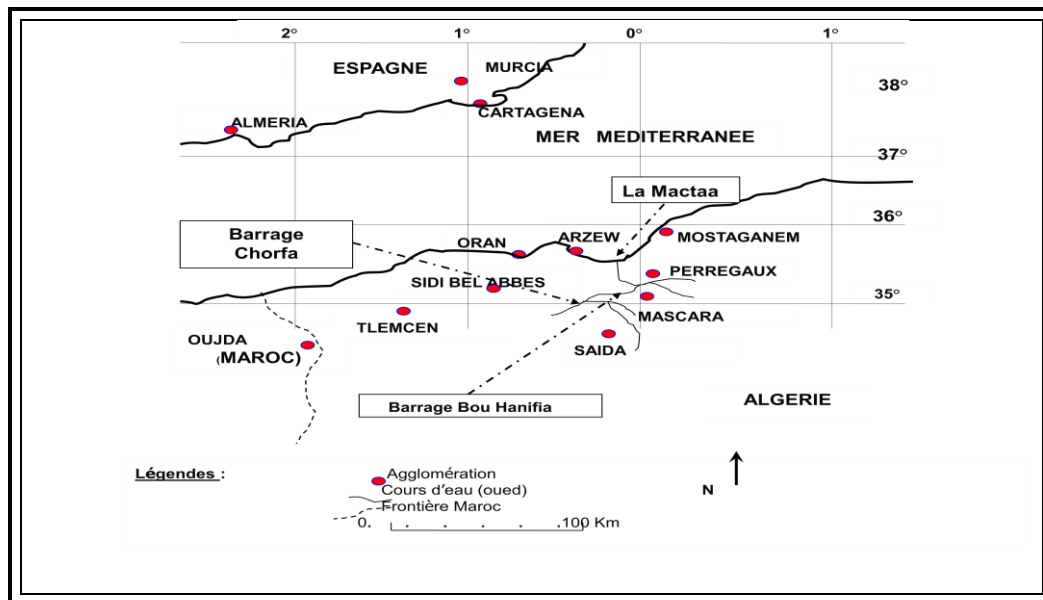


Figure I.30 : Situation géographique de la ville de Mascara et du barrage de Chorfa.

Les figures I.31 I.32 et I.33 représentent des photos récentes du barrage de Chorfa.

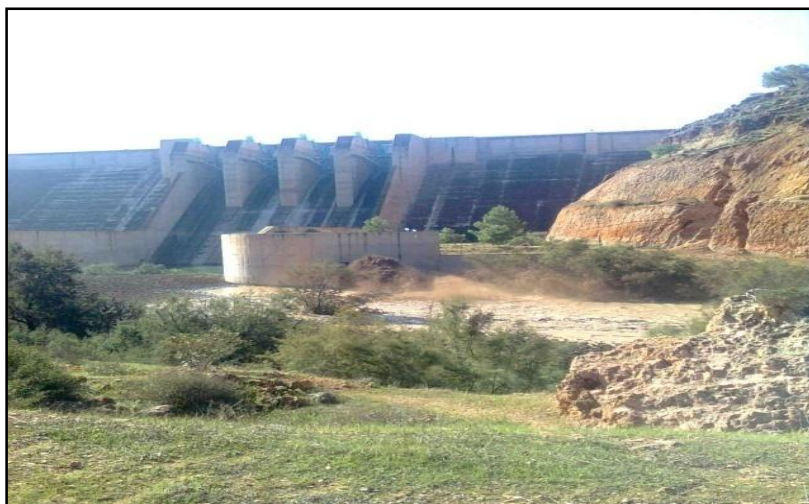


Figure I.31 : Vue générale du barrage de Chorfa

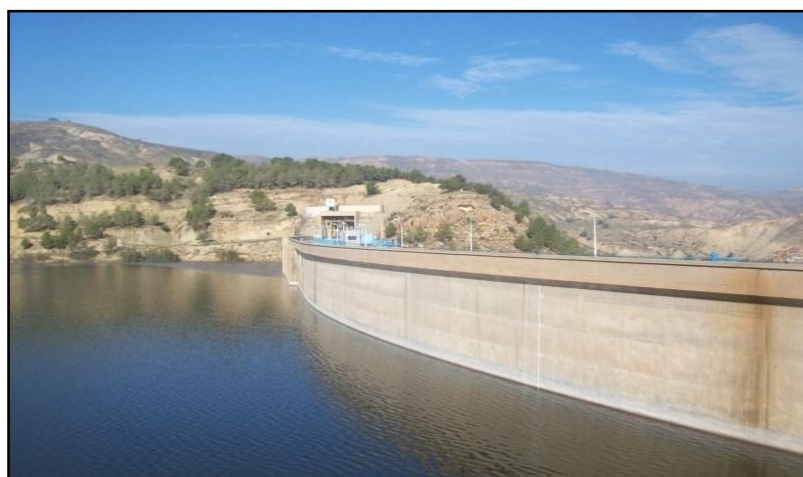


Figure I.32 : Vue du côté interne de la digue du barrage Chorfa

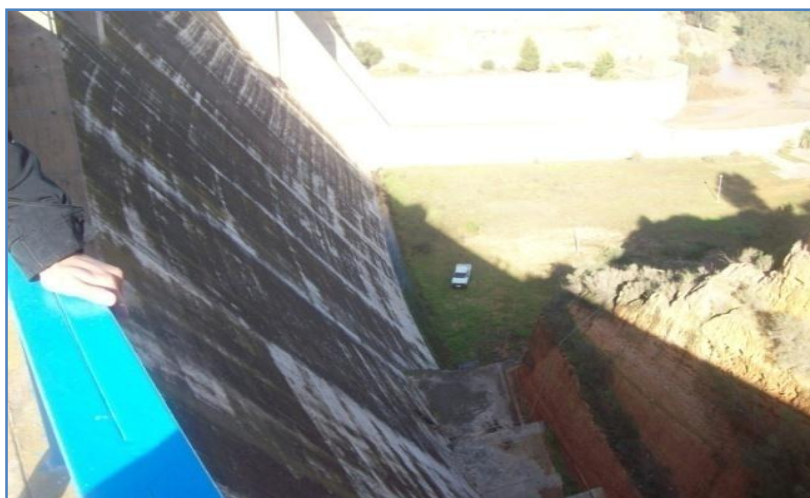


Figure I.33 : Vue du côté interne de la digue du barrage Chorfa

Le barrage Chorfa comme beaucoup d'autres en Algérie est soumis à un phénomène d'envasement progressif. Ces dernières années sa capacité a chuté d'une dizaine de millions de m³; soit un taux annuel d'envasement dépassant un million de m³.

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.

I.3. LES SEDIMENTS DE DRAGAGE (VASE)

I.3.1. 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 [104].

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 [105].
- **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 organiques, de nutriments ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques [106].

I.3.2. Constitution des sédiments

Les vases sont constituées de 4 éléments principaux [107]

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.

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.

I.3.3. Le dragage des sédiments

Le curage ou bien le dragage constitue 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 [108]. La figure I.34 présente une photo d'un engin mécanique de dragage :



Figure I.34 : Engin mécanique de dragage [109].

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, [107].

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.

I.3.4. 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, ils constituent une voie privilégiée, ils peuvent être utilisés en tant que matériaux pour remblais, couches de forme, assises de chaussées non traités ou traités. Les déchets remplacent ainsi une partie de matériaux traditionnels.

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.

Etudes relatives à la valorisation de la vase

Dans le cadre de sa recherche sur l'envasement du barrage de Fergoug, Semcha [102] a démontré que l'analyse minéralogique au DRX (Figure I.35) met en évidence la prépondérance du quartz et de la calcite ainsi que la présence de dolomite et kaolinite. L'analyse thermique différentielle (ATD) (Figure I.36) a permis de détecter la présence de la kaolinite et celle des carbonates. Le traitement thermique par calcination à 750 C° de la matière argileuse a permis la formation d'une structure amorphe à caractère pouzzolanique.

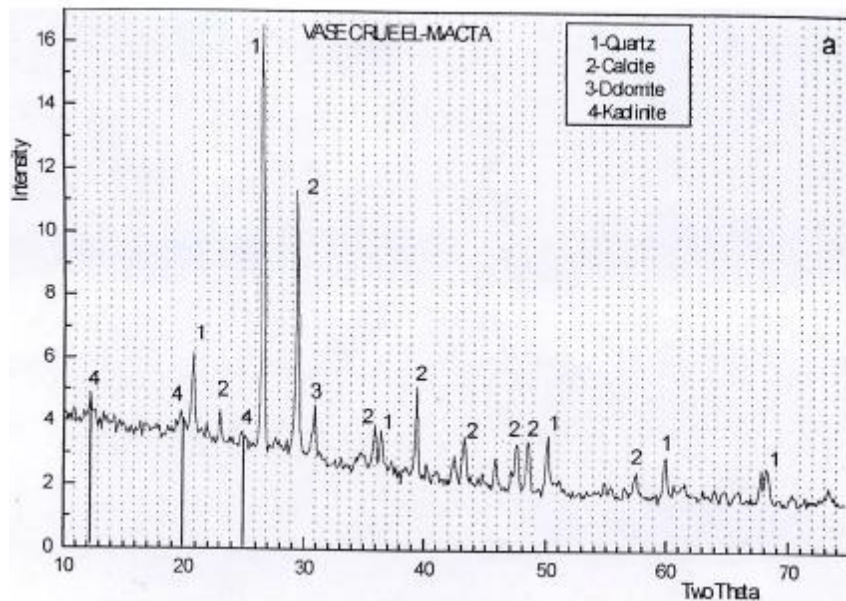


Figure I.35 : Courbe DRX de la vase de Fergoug. [102]

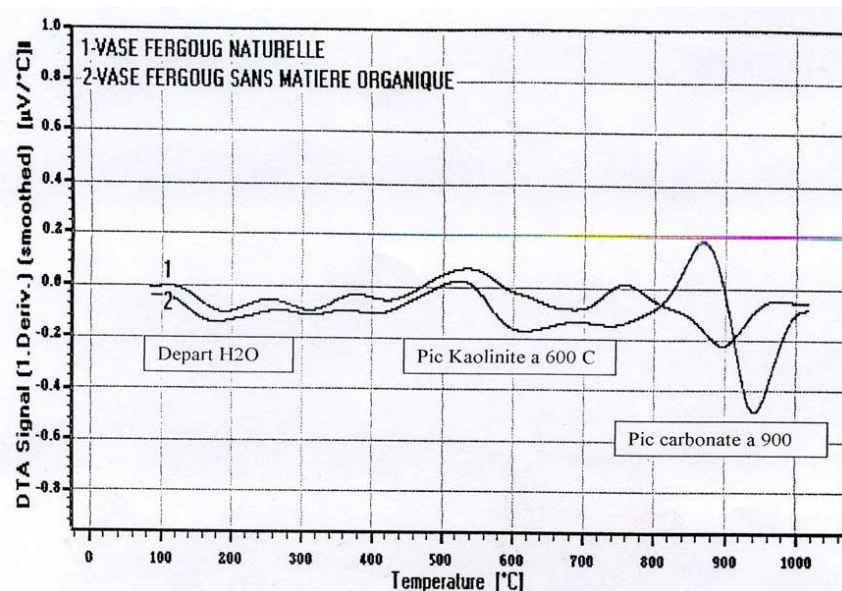


Figure I.36 : Courbe ATD de la vase de Fergoug [102].

La température de calcination optimale se situe donc 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 [102].

Le caractère pouzzolanique de la vase a été mis en évidence à l'aide d'essais mécaniques effectués sur des pâtes durcies confectionnées à partir d'un mélange ciment et vase calcinée à différents pourcentages.

Les résultats obtenus étaient des plus intéressants, en effet l'optimisation d'un pourcentage approprié a démontré que ce mélange développe des propriétés mécaniques intéressantes (résistance à la compression); notamment pour un taux de 30 % qui s'avérait très satisfaisant et peut être intéressant pour la fabrication de ciment à moindre coût (Figure I.37).

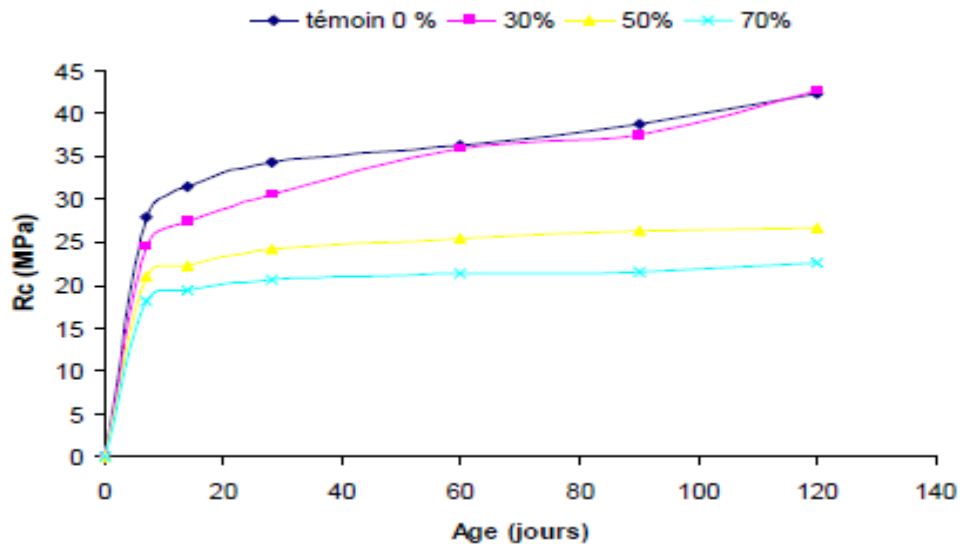


Figure I.37: Résistance mécanique des quatre mélanges étudiés [102]

Plusieurs travaux de recherches ont été réalisés évoquant la possibilité de fabriquer des mortiers [110] et des bétons [111] dont le ciment est composé de vase calcinée utilisant des dosages allant jusqu'à 20 %.

I.4. LES POUZZOLANES

I.4.1. Définition

Les pouzzolanes naturelles sont des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires essentiellement composées de silice, d'alumine et d'oxyde de fer et ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques : elles sont 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 [112]:

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 [112]. 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.

I.4.2. La pouzzolane naturelle de Béni-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. 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 approvisionnement 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 [102]:

- ✓ 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.

I.4.3. Etudes relatives à la Pouzzolane Naturelle de Béni-saf

D'après l'étude de Semcha [102], 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 [113],.Mebrouki et al [114]., Eziane et al [115]., Mouli et Khelafi [116], ont démontré que la pouzzolane du Beni-Saf possède des propriétés pouzzolaniques et améliorent les propriétés des matériaux cimentaires dans lesquels elle est incorporée.

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 [80]. 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 [80].

I.5. CONCLUSION

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

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 incorporant la vase.

L'objectif de cette étude est de valoriser un sédiment de dragage qui est la vase draguée des barrages de Chorfa et Fergoug et l'utiliser 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.

PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

Plusieurs barrages en Algérie sont connus pour leurs fort taux d'envasement, qui conduisent à une chute sans cesse du potentiel hydraulique du pays au cours du temps, tels que les bassins versants d'Oued Fergoug et de Chorfa situés à l'ouest du pays. Leurs envasements ont été estimés respectivement à 1.5 et 0.36 millions de mètre cube de vase par an, selon le levé bathymétrique effectué par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) [99].

L'envasement des barrages constitue malheureusement un problème à deux faces puisqu'il est responsable de la diminution du niveau d'eau potable et d'irrigation d'une part et il est la cause de la détérioration de l'environnement d'autre part. Les barrages de Fergoug et de Chorfa n'ont pas échappés à ce problème.

Les causes et les problèmes provoqués par l'envasement étant connus, 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 et l'étude de leurs durabilité envers les agressions chimiques externes.

Pour enrichir et approfondir les recherches entamées sur la vase, notre étude a été engagée. Elle consiste en la mise en place d'une fine utilisable dans la fabrication de béton autoplaçant ayant des performances acceptables. C'est pour cette raison que nous avons jugé utile d'apporter notre modeste contribution afin de pouvoir valoriser la vase du barrage de Fergoug

et Chorfa 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, deux questions auxquelles des réponses s'imposent sont :

« Serait-il possible d'obtenir un BAP à partir d'une substitution d'une quantité de ciment par une quantité de vase extraite du barrage de Fergoug et Chorfa ? »

« Et ce béton autoplaçant serait-il résistant vis-à-vis des attaques sulfatiques, acides et de la carbonatation ? »

Pour répondre à ces deux questions un large protocole expérimental a été adopté. Il sera donc question de mettre en évidence l'effet de l'incorporation de 20 % de vase substituée au ciment sur le développement des résistances mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçants. Concernant la durabilité, il s'agit d'étudier la résistance de ces bétons aux les attaques des sulfates (Na_2SO_4 et MgSO_4), des acides (HCl e H_2SO_4) et la carbonatation (naturelle et accélérée). Les résultats obtenus sont comparés à ceux relatifs au béton autoplaçant témoin et au BAP à base de pouzzolane naturelle.

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

✓ **Ecologiques**

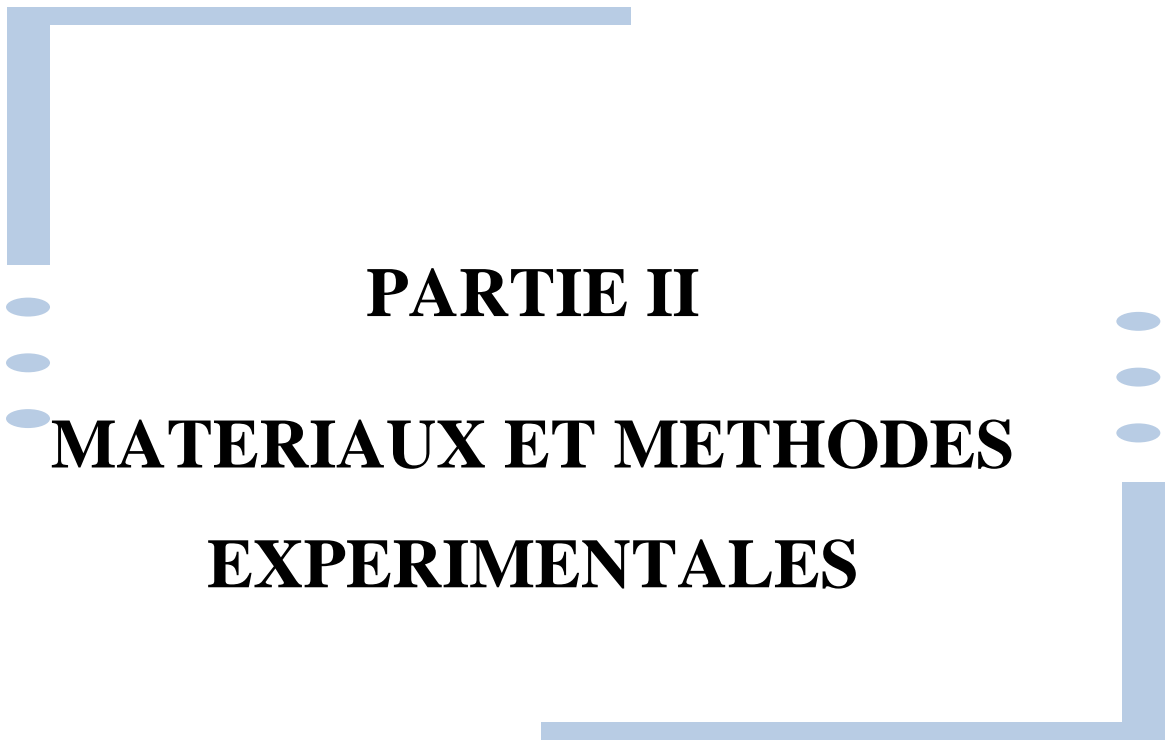
Il s'agit de procéder à la diminution des quantités de vase stockées en aval du barrage de Fergoug et Chorfa en les utilisant, après traitement comme additions minérales dans la fabrication du béton autoplaçants. Ce qui aura un impact écologique important en contribuant à la préservation de l'environnement par la diminution de l'utilisation du ciment dégageant des gaz à effet de serre.

✓ **Economiques**

Comme toutes les additions minérales (pouzzolane, fillers calcaire, laitier,...), la vase calcinée de Fergoug et Chorfa, un matériau intéressant et bon marché, 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.

Technologique

L'élaboration de bétons autoplacants à base de vase calcinée ayant des performances mécaniques et physico – chimiques égales et éventuellement meilleures que celles des BAP incorporant d'autres additions assurera un véritable succès technologique dans le domaine des matériaux de construction.



PARTIE II

MATERIAUX ET METHODES

EXPERIMENTALES



CHAPITRE 1:

MATERIAUX



CHAPITRE 1 : MATERIAUX

II.1. INTRODUCTION

Les objectifs de cette étude expérimentale visent à réaliser des bétons autoplaçants à base de sédiments traités (vase calcinée) en caractérisant leurs performances physiques, mécaniques et de durabilité.

Le béton autoplaçant (BAP) est constitué de ciment, de granulats, d'eau, d'adjuvants et d'ajouts. En effet, le travail que nous présentons met en évidence l'utilisation de la pouzzolane artificielle (vase calcinée du barrage de Fergoug et de Chorfa (Mascara)) et la pouzzolane naturelle de (Béni-saf), dans le but de son exploitation en substitution partielle au ciment.

Le comportement rhéologique du BAP est le résultat d'une interaction complexe entre ses divers constituants, c'est la raison pour laquelle, des essais de caractérisation et d'identification des matériaux entrant dans les compositions des matériaux cimentaires étudiés (mortiers et bétons) sont décrits dans ce chapitre.

II.2. IDENTIFICATION DES MATERIAUX

II.2.1. Ciment

Un seul type de ciment a été utilisé pour des différentes compositions : un ciment CEMI 42,5 ES provenant de l'usine de Zahana (Ouest Algérien). Le choix du ciment sans ajouts nous permettra d'un côté d'éviter l'interaction entre ses additifs et les substituants (vase calcinée, pouzzolane naturelle), et d'un autre côté d'étudier l'effet des ces substituants sur les performances des bétons autoplaçants.

Ce ciment a une surface spécifique Blaine de 3219 cm²/g et une densité de 3,13. Le détail de sa composition chimique et minéralogique est donné dans les tableaux II.1 et II. 2.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF	RI
Teneur en %	22.30	5.10	3.99	63.60	1.43	1.24	0.70	0.34	1.18	0.36

Tableau II.1: Composition chimique du ciment

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO libre
53.13	23.55	6.76	12.13	< 01

Tableau II.2: Composition minéralogique (%) du clinker

II.2.2. Granulats

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) [5]. Les caractéristiques chimiques des granulats utilisés sont données par le tableau II.3.

Constituants chimiques	Sable de mer (SM) (%)	Sable de carrière (SC), G3/8, G8/15 (%)
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	10.23
Nature	Siliceuse	Calcaire

Tableau II.3 : Analyse chimique des granulats

Dans notre composition, nous avons utilisé deux sables de fraction 0/4 : un sable de mer naturel et un sable de concassage. Les résultats de la caractérisation physique des granulats utilisés sont représentés dans le tableau II.4.

Caractéristiques	S.de mer (SM)	S. de carrière (SC)	Graviers	
			(3/8)	(8/15)
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.51	1.52	1.43	1.45
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.59	2.66	2.63	2.64
Equivalent de sable (%)	Visuel	89.03	-	-
	Piston	85.21		
Module de finesse	1.66	2.63	-	-
Pourcentage de fines (%)	0.67	0.90	0.41	0.33
Absorption (%)	1.12	0.81	0.58	0.61

Tableau II.4: Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques des granulats utilisés

La Figure II.1 représente les courbes de l'analyse granulométriques des différents granulats utilisés.

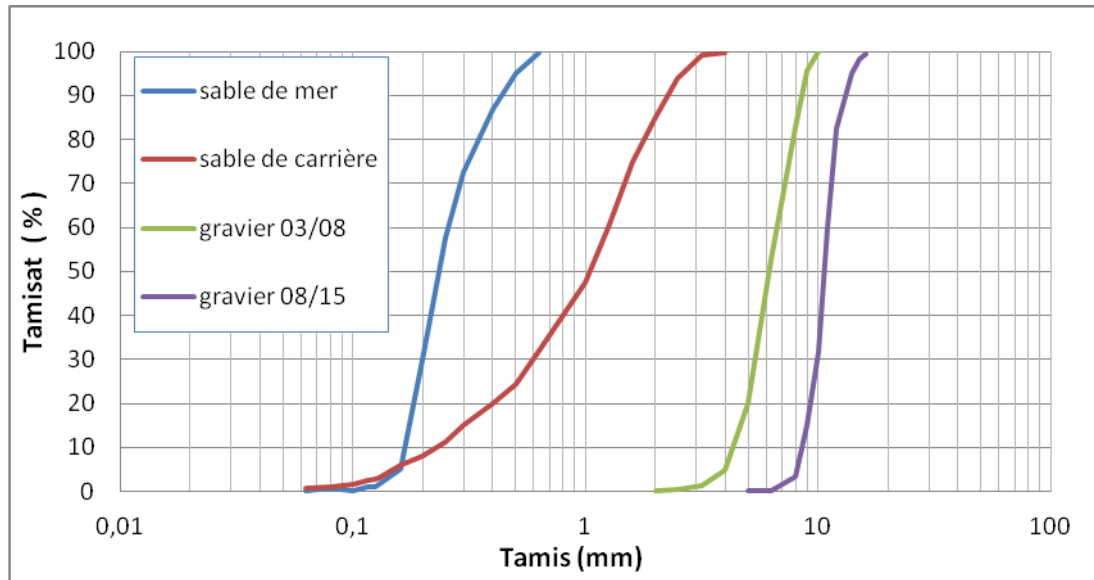


Figure II.1: Distribution granulométrique des granulats

II.2.3. Additions

Le béton autoplaçant est caractérisé par un volume de pâte important dû à une quantité d'additions plus élevée comparé à celui des bétons ordinaires vibrés.

Nous avons utilisé dans notre étude trois types d'additions : la vase calcinée du barrage Chorfa, la vase issue du barrage de Fergoug et la pouzzolane naturelle de la région de Béni-saf. L'analyse granulométrique de ces additions est représentée sur la Figure II.2

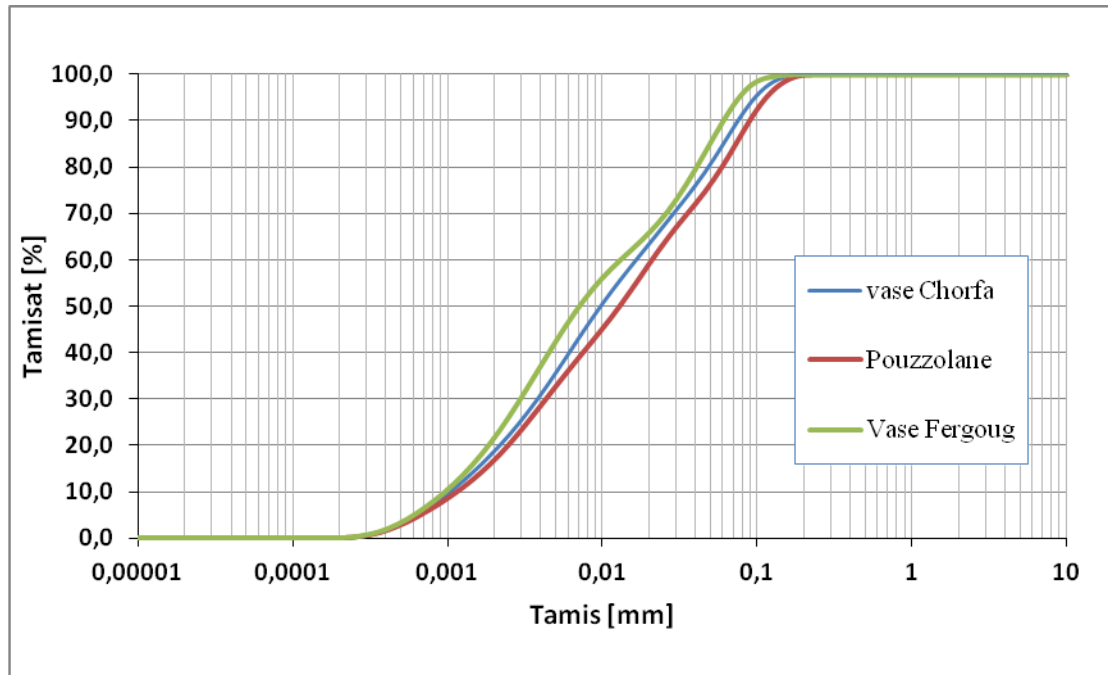


Figure II.2: Courbes granulométriques des additions utilisés

A partir de ces courbes, on remarque un pourcentage des particules fines plus important pour la vase de Fergoug par rapport celle de Chorfa qui elle-même, représente plus de particules fines que la pouzzolane naturelle de Beni-Saf.

II.2.3.1. La pouzzolane naturelle :

C'est une pouzzolane naturelle d'origine volcanique extraite du gisement volcanique dans la région de Beni-Saf (ouest algérien). Cette pouzzolane est fournie sous forme de roches concassées de type pierre ponce et scorie (Figure II.3). 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 .

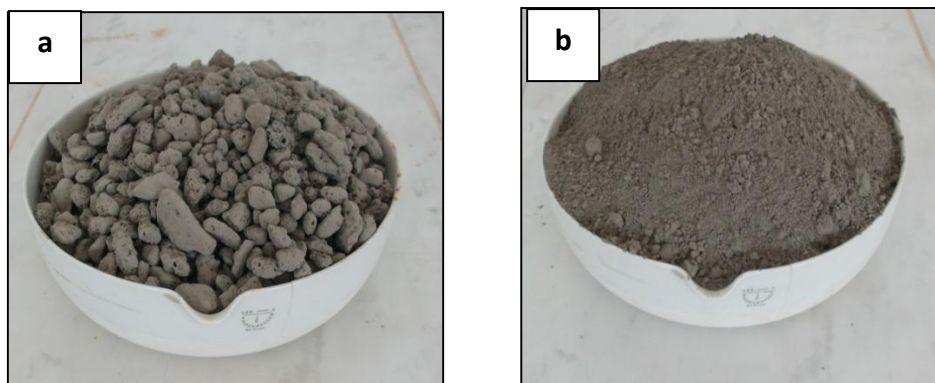


Figure II.3: la pouzzolane naturelle utilisée, (a) avant broyage, (b) après broyage.

La poudre résultante a fait l'objet d'une analyse physico - chimique, dont les résultats sont fournis dans le tableau II.5.

Elément (Teneur en %)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF
Pouzzolane naturelle	45.96	16.32	9.41	9.72	4.57	0.11	1.59	0.47	4.85

Tableau II. 5 : Analyse chimique de la pouzzolane naturelle

Caractéristiques	Valeurs
	pouzzolane naturelle
Masse volumique apparente de la vase (g/cm ³)	0.81
Masse volumique absolue de la vase (g/cm ³)	2,73
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g)	4453

Tableau II.6 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle

II.2.3.2. La Vase Calcinée

Toute la quantité de la vase utilisée est prélevée dans la zone de rejet en aval des barrages de Fergoug et de Chorfa.

La composition chimique de la vase 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 étapes suivantes (Figure II.4) :

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 [102].

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. Celle-ci doit être conservée à l'abri de l'air et de l'humidité dans des sacs hermétiques.

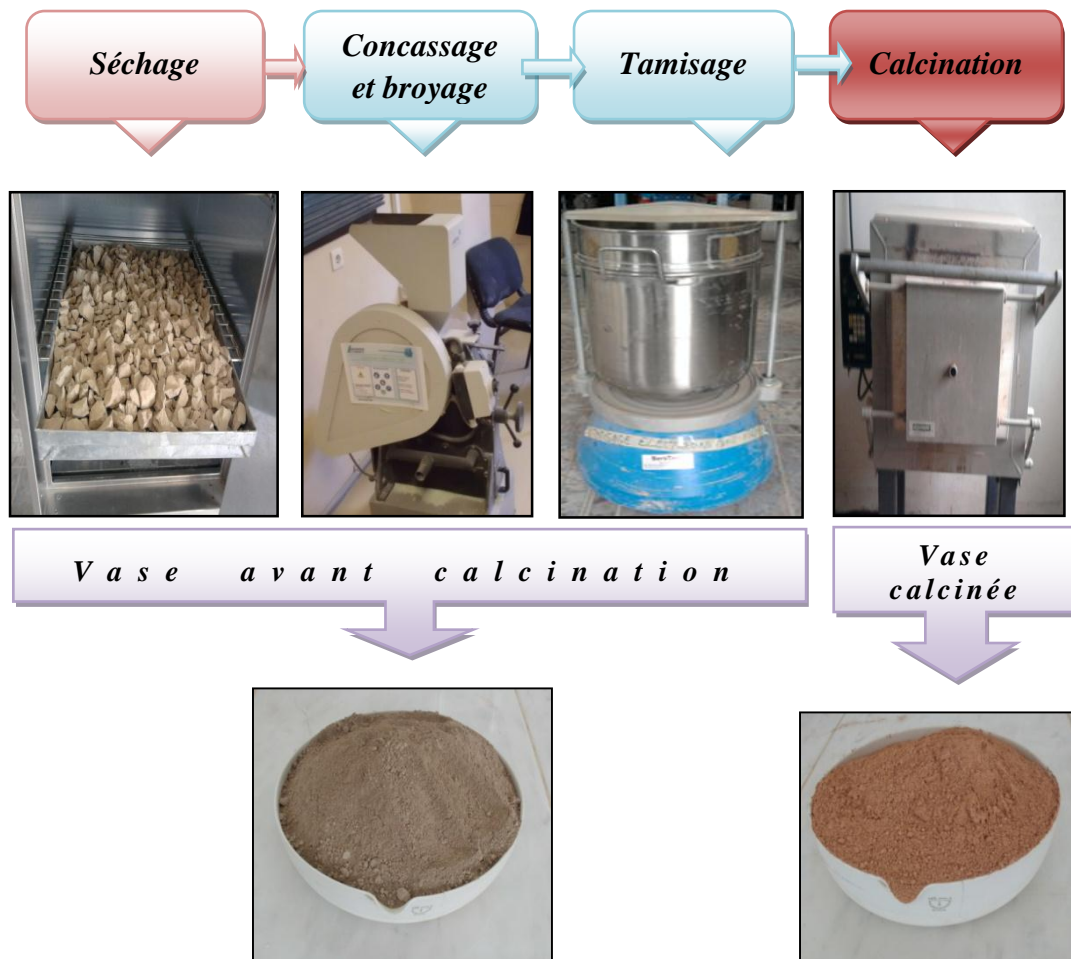


Figure II.4 : Les étapes de la préparation de la vase.

Les caractéristiques chimiques et physiques des vases après calcination sont représentées dans le tableau II.7 et II.8

Elément		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF
Teneur en %	Vase calcinée de Chorfa	47,36	15,75	7,43	23,08	2,67	0,17	2,97	0,37	1,76
	Vase calcinée de Fergoug	51,69	15,49	7,53	18,06	3,08	0,23	2,99	0,41	1,87

Tableau II.7 : Caractéristiques chimiques des vases après calcination

Caractéristiques	Valeurs	
	Vase Chorfa	Vase Fergoug
Masse volumique apparente de la vase (g/cm^3)	0,59	0.89
Masse volumique absolue de la vase (g/cm^3)	2,65	2.66
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm^2/g)	7190	6740

Tableau II.8 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques de la vase

II.2.4. Les adjuvants

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.

Deux types d'adjuvants ont été employés durant notre étude, un plastifiant réducteur d'eau pour les formulations des mortiers à base d'ajouts (vases et pouzzolane) PLASTIMENT BV 40 et un superplastifiant SIKA VISCOCRETE TEMPO 12, dont les fiches techniques sont dans l'Annexe 1 et 2. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique, conforme à la norme NF EN 934-2. Il se caractérise par son grand maintien de rhéologie et de sa résistance à la ségrégation. Ces caractéristiques nous ont permis de réaliser tous les essais préconisés pour les BAP à l'état frais sans utiliser de retardateur de prise ou d'agent de viscosité. Les caractéristiques des adjuvants sont données par le tableau II.8.

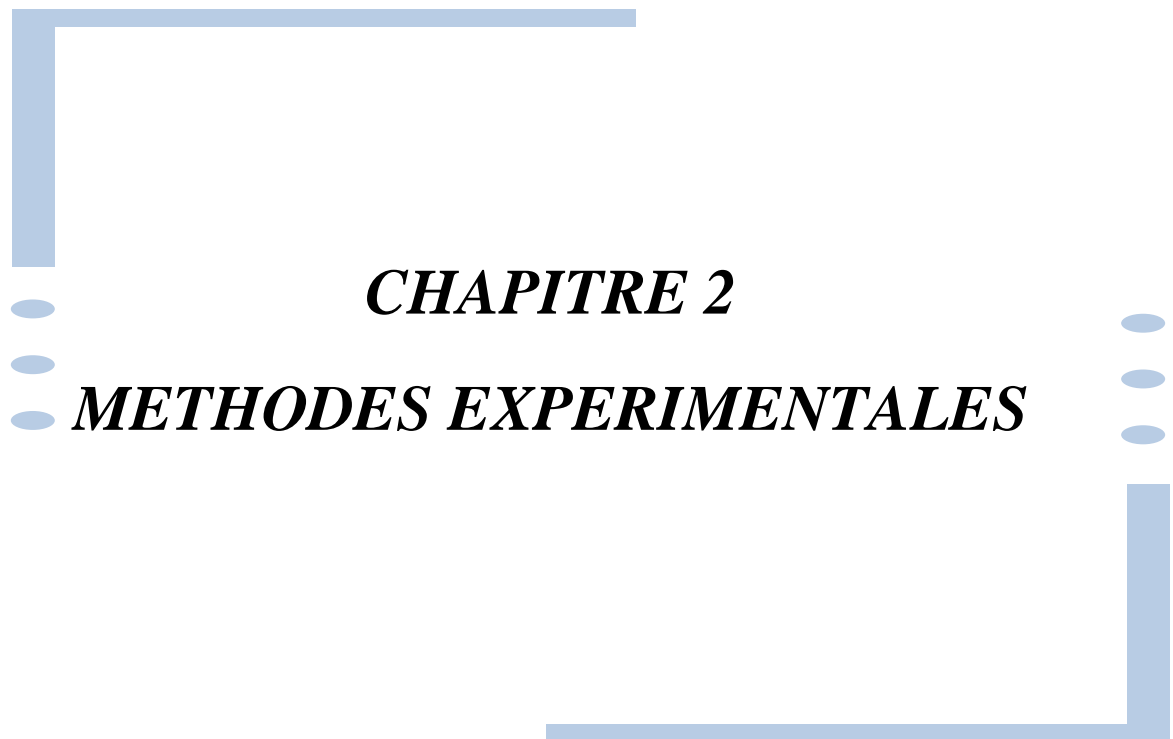
Caractéristiques	VISCOCRETE TEMPO 12	PLASTIMENT BV 40
Aspect	Liquide brun clair	Brun foncé
Densité	$1,06 \pm 0,01$	$1,180 \pm 0.015$
pH	6 ± 1	$4,5 \pm 1$
Teneur en Na_2O Eq.	$\leq 1 \%$	$\leq 2\%$
Extrait sec	$30,2 \pm 1,3 \%$	$38,5 \pm 1,9\%$
Teneur en ions Cl^-	$\leq 0,1 \%$	$\leq 0,1\%$

Tableau II.9 : Caractéristiques des adjuvants

II.3. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons identifié tous les matériaux entrant dans la composition des BAP. C'est une étape nécessaire avant d'entamer l'étude expérimentale de ces bétons.

La vase issue du dragage de Chorfa et de Fergoug a nécessité une calcination afin de la rendre plus réactive.



CHAPITRE 2
METHODES EXPERIMENTALES

CHAPITRE 2 : METHODES EXPERIMENTALES

II.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, sont décrits les essais normalisés préconisés dans notre étude. Ces essais sont relatifs à l'étude des propriétés des matériaux cimentaires (pâtes, mortiers et BAP) à base de vase calcinée, et de pouzzolane naturelle, ainsi que des formulations témoins pour le besoin de comparaison

Le début des investigations a été sur pâtes normalisées par des essais de mesure de temps de prise puis sur mortiers par des mesures de chaleur d'hydratation et de résistances à la compression, et enfin sur BAP par des essais de caractérisation à l'état frais, durci et de durabilité.

L'organigramme (Figure II.5) détaille les étapes de l'étude.

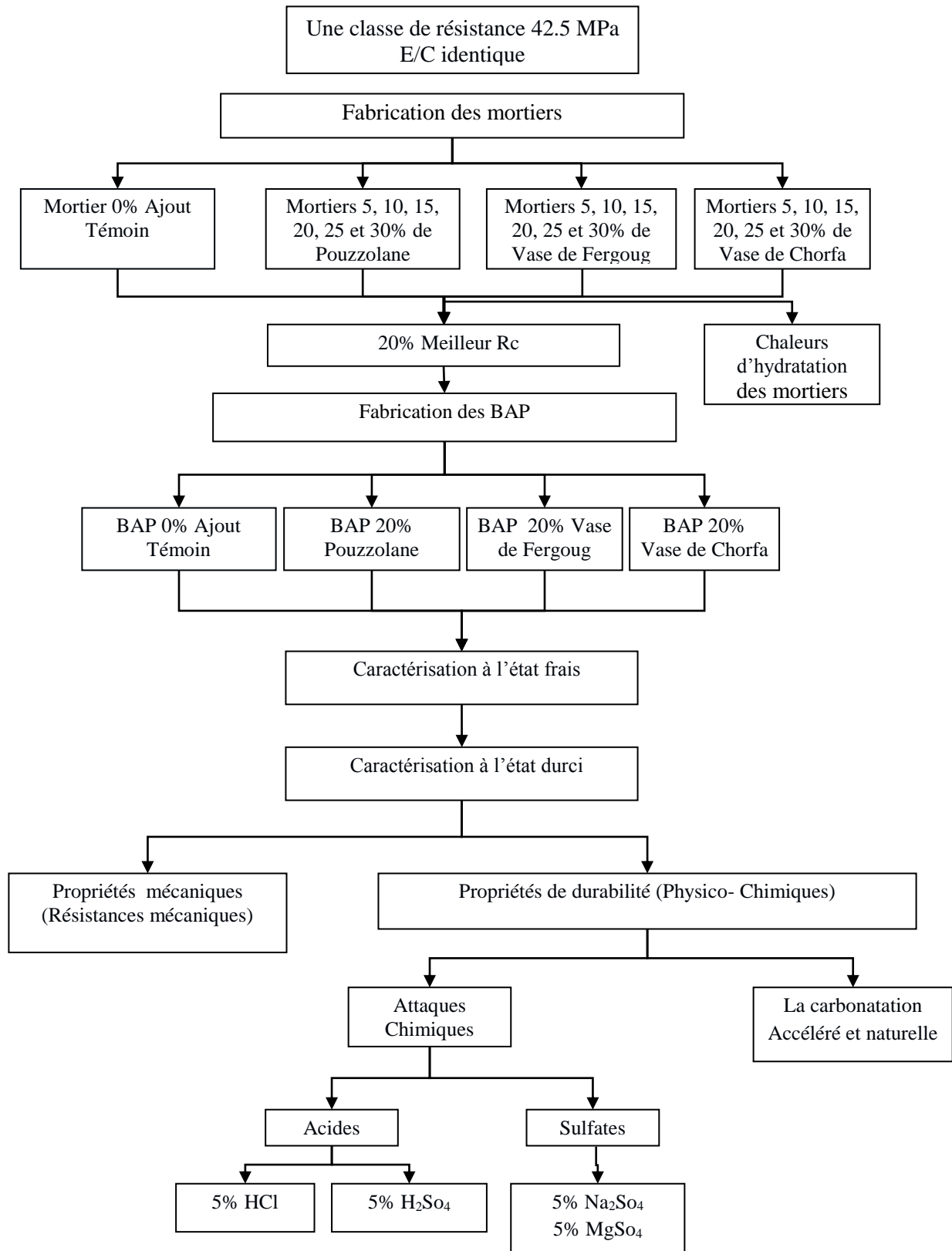


Figure II.5: Organigramme résumant le travail expérimental mené dans cette étude

II.2 ESSAIS SUR PATES NORMALISEES

II.2.1 Essais de consistance

Pour chaque liant hydraulique, il y a une teneur en eau nécessaire qui donne à la pâte une consistance dite « normale ». Cette consistance est déterminée selon la norme NF EN 196-3 à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une sonde.

La consistance de la pâte de ciment est sa plus ou moins grande fluidité. C'est une caractéristique qui évolue au cours du temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées.

II.2.2 Essais de prise

Il est nécessaire de connaître le temps de début de prise des liants hydrauliques en vue de déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre in situ des mortiers et des bétons dont ils sont confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques : Le début et la fin de prise.

II.3 ESSAIS SUR MORTIERS

II.3.1 Formulation des mortiers

Nous utiliserons des mortiers normalisés, selon la norme (NFP 15-403), la composition est la suivante :

- 450g de liant, les ajouts étant toujours introduits en substitution du ciment (5, 10, 15, 20, 25, et 30% de vase et de pouzzolane par rapport au volume du ciment);
- 1350g de sable normalisé siliceux de granulométrie comprise entre 0.08 et 2 mm

Ceci correspond donc à un rapport sable/ciment égal à 3.

Le taux de l'eau de gâchage a été maintenu constant pour l'ensemble des gâchées : $E/C = 0.5$.

Le mortier normalisé décrit précédemment est réalisé à l'aide d'un malaxeur HOBART, dans une cuve de cinq litres répandant aux caractéristiques de la norme NFP 15-411.

Cette cuve nous permet de réaliser la quantité de mortier nécessaire à l'élaboration des séries d'éprouvettes de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ destinées pour les essais de compressions.

La procédure de malaxage est celle préconisée par la norme (NFP 15-403).

II.3.2 Maniabilité des mortiers

La maniabilité du mortier est déterminée à l'aide d'un Maniabilimètre (LCPC). Dans cet essai, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration (NF P 18 - 452 et NF P 15 -437.).

Les éprouvettes sont conservées pendant 24 heures à 20 ± 2 ° C, recouvertes d'un film plastique pour éviter l'évaporation d'eau. Elles sont ensuite démoulées et conservées pendant 27 jours à 20 ± 2 ° C sous l'eau saturée de chaux, de sorte que l'eau de cure ne dissout pas la chaux contenue dans le mortier durci.

La maniabilité des mortiers caractérisés par un rapport E/C et un volume de pâte constant a été gardée commune aux alentours de 8 secondes.

II.3.3. Essai de chaleur d'hydratation

Selon la norme NF EN 196-9, un essai réalisé sur des mortiers décrit une méthode de mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi-adiabatique, dite méthode de Langavant.

L'essai a pour but de mesurer en continu la chaleur d'hydratation du ciment au cours des tout premiers jours. La chaleur d'hydratation est exprimée en joules par gramme de ciment.

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre (Figure II.6) afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai.

Etant donné que les conditions extérieures sont très influentes, le test a été effectué dans une chambre climatisée à 20 ± 2 ° C.



Figure II.6 : Calorimètre Langavant

La température est définie comme étant la différence entre la température du mortier testé et un mortier inerte âgés de trois mois.

La chaleur d'hydratation du béton est la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et la chaleur dispersé dans l'environnement

Au temps t , q la chaleur d'hydratation par gramme de liant (ciment + addition) est obtenue par l'Equation II.1.

$$q = \frac{c}{m_c} \Delta\Theta + \frac{1}{m_c} \int_0^t \alpha \Delta\Theta dt \quad (\text{II.1})$$

Où

C est la capacité thermique totale de l'appareil ($J/^\circ\text{C}$),

m_c est la masse du ciment ou la masse de liant (g),

$\Delta\Theta$ est la différence de température entre le mortier et la température ambiante ($^\circ\text{C}$),

a est le coefficient thermique global de perte du calorimètre ($J / h \text{ } ^\circ\text{C}$).

L'élévation de température dans le mortier a été surveillée en permanence par l'utilisation de thermocouples et un système d'acquisition de données.

La chaleur d'hydratation a été mesurée pendant 4 jours, étant donné que l'augmentation de la chaleur est très faible aux âges plus avancés.

Les dosages des constituants en (g) entrant dans les formulations des mortiers sont donnés par le tableau II.10.

Code	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
E/C	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Vases/C, Pouzzolane/C (%)	0	5	10	15	20	25	30
Sable (g)	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Ciment (g)	450	439,8	429,9	420,6	411,6	402,9	394,7
Vases ou Pouzzolane (g)	0	22,0	43,0	63,1	82,3	100,7	118,4
Eau (g)	225	219,9	215,0	210,3	205,8	201,5	197,3
Sp, Vase (g)	0	0.44	1.07	1.93	2.76	3.71	5.01
Sp, Pouzzolane (g)	0	0.22	0.64	1.47	2.47	3.22	4.93
Volume de pâte (cm ³)	370,2	370,2	370,2	370,2	370,2	370,2	370,2

Tableau II.10 : Formulation des mortiers

II.3.4 Essais Mécaniques

II.3.4.1 Confection des éprouvettes

On a utilisé des éprouvettes prismatiques 40 x 40 x 160 mm³ pour les essais de compression.

19 combinaisons de mortiers normalisés ont été préparés soit 342 spécimens et ce à partir de différents pourcentages d'ajout: (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30%) pouzzolane naturelle « PZ », vase de Chorfa « VC » et vase de Fergoug « VF » avec un rapport E/C = 0.5.

II.3.4.2 Procédure d'essai:

Les échantillons d'essais ont été confectionnés conformément à la Norme ENV 197-1 et compactés mécaniquement à l'aide d'une table à choc. Une fois arasés, les moules contenant les échantillons sont couverts de film en plastique et stockés dans l'environnement de laboratoire sous une température de 20° ± 1°C et une humidité relative d'environ 55 ± 5%. Le démoulage est effectué après une durée de 24h et les échantillons sont conservés au laboratoire dans l'eau jusqu'à l'échéance d'essai.

Il est à noter que les essais mécaniques ont été effectués aux échéances de : 2 – 7 – 14 – 28 – 60 – 90 et 180 jours.

II.3.4.3 Résistance à la compression

La résistance à la compression des mortiers a été évaluée sur les six demi prismes. Le demi-prisme est centré entre les deux plateaux d'une presse (de la marque IBERTEST) (figure II.7) et un chargement est effectué à une vitesse constante de 0.5 KN/s jusqu'à la rupture. On effectue la lecture de la résistance à la compression R_c en MPa sur l'écran. Les essais sont effectués conformément à la Norme NF P15-471.



Figure II.7 : Appareil IBERTEST (essai de flexion et compression)

II.4 ESSAIS DE CARACTERISATION DES BAP

Tous les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur des BAP contenant la vase calcinée et la pouzzolane naturelle, ainsi que sur un BAP témoin. Les premiers essais réalisés concernent l'étude des propriétés à l'état frais afin d'estimer la fluidité et la ségrégation dynamique et statique (essais d'étalement au cône, de la boîte en L et de stabilité au tamis).

Ensuite, divers essais relatifs aux caractéristiques mécanique et physico-chimique ont été réalisés. Plusieurs d'entre eux ont été exécutés à des échéances précises (résistance mécanique) alors que d'autres ont nécessité un suivi continue (carbonatation et attaques des sulfates et acides).

II.4.1 Elaboration des BAP

La fabrication du BAP a pu être réalisée sans problème avec des moyens conventionnels. En effet, il existe plusieurs méthodes de formulation plus au moins compliquée. Pour le présent travail, nous avons utilisé les mêmes méthodes de formulation que celles déjà utilisées pour nos travaux de Magister [117].

Quatre formulations de béton ont été mises au point pour cette étude. Il s'agit d'un BAP témoin de référence (BAP T) sans aucune addition, un BAP à base de vase calcinée de Fergoug (BAP VF), un BAP avec la vase calcinée de Chorfa (BAP VC) et un BAP incorporant la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (BAP PZ). Pour ces derniers, nous avons introduit les différentes additions avec un dosage de 20 % par rapport au volume du ciment.

Le dosage du superplastifiant a été choisi de manière expérimentale à partir des essais sur bétons frais pour avoir un étalement aussi proche que possible de 69 ± 1 cm pour les quatre BAP.

Le tableau II.11 donne la composition des différents BAP étudiés au cours de ce travail de recherche.

Compositions (Kg/m ³)	BAP T	BAP VC	BAP VF	BAP PZ
Ciment	448.16	407.61	407.96	410.23
Vase (Chorfa)		81.52	-	-
Vase (Fergoug)	-	-	81.59	-
Pouzzolane N	-	-	-	82.05
Eau	224.08	203.81	203.98	205.12
Superplastifiant	8.20	11.01	10.61	9.64
Sable de mer	560	560	560	560
Sable de concassage	251	251	251	251
Gravier 3/8	333	333	333	333
Gravier 8/15	499	499	499	499

Tableau II.11 : Compositions des BAP

Les différentes caractéristiques des quatre BAP sont illustrées dans le tableau II.12 :

Caractéristiques	BAP T	BAP VC	BAP VF	BAP PZ
E/C	0.5	0.5	0.5	0.5
Ajout/Ciment (%)	-	20	20	20
Sp/C (%)	1.83	2.7	2.60	2.35
Volume de pâte (l/m³)	375	375	375	375
G/S	1.02	1.02	1.02	1.02

Volume de squelette granulaire (l/m³)		625	625	625	625
Masse volumique théorique (Kg/m³)		2323.44	2349.02	2347.14	2350.04
Masse volumique réelle à l'état (Kg/m³)	Frais	2371.36	2373.22	2371.36	2392.74
	Durci	2362.47	2364.33	2362.47	2379.81

Tableau II.12: Caractéristiques des BAP confectionnés

II.4.2 Essais de caractérisation à l'état frais

Avant de définir une composition comme étant celle d'un BAP, il faut s'assurer que les propriétés du béton à l'état frais obéissent à certains critères établis par les recommandations de l'AFGC (Association Française de Génie Civil) [118].

Des essais spécifiques permettent de caractériser les BAP à l'état frais. On présentera ceux qui ont été effectués dans cette étude :

- ✓ *Essai d'étalement (slump flow) ;*
- ✓ *Essai de L-Box ;*
- ✓ *Essai de J-Ring ;*
- ✓ *Essai de stabilité au tamis ;*
- ✓ *Essai de ressuage.*

A- *L'essai d'étalement (slump flow)*

L'essai d'étalement ou (slump flow) (Figure II.8) est utilisé pour caractériser la fluidité d'un béton autoplaçant.

L'équipement nécessaire à la conduite de cet essai est composé des éléments suivants :

- ✓ *Un cône d'Abrams ;*
- ✓ *Une plaque métallique carrée d'au moins 90 cm graduée à un diamètre de 50±1 cm ;*
- ✓ *Un mètre ;*
- ✓ *Un niveau à bulle ;*
- ✓ *Un chronomètre.*

Le protocole de mesure adopté est le suivant :

1. Humidification du cône et de la plaque métallique ;
2. Remplissage du cône par le BAP préparé ;
3. Arasage de la surface du cône et soulèvement vertical de celui-ci ;

4. Mesure du temps de passage au diamètre de 50 cm appelé t_{50} ;
5. Mesure de l'étalement selon deux diamètres perpendiculaires, puis calcul de la moyenne (Equation II.2).

$$\varnothing = (D_1 + D_2) / 2 \quad (\text{II.2})$$

Le béton est qualifié d'autoplacant si son étalement est compris entre 60 et 75 cm ; si non la composition doit être revue [118].



Figure II.8 : Essai de l'étalement.

B- Essai de L-Box

L'essai de la boîte en L (Figure II.9) 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 et la ségrégation dynamique.

L'équipement nécessaire à la conduite de cet essai est composé des éléments suivants :

- ✓ Boite en L ;
- ✓ Un mètre ;
- ✓ Un niveau à bulle ;
- ✓ Un chronomètre.

Le protocole de mesure adopté est le suivant :

Treize litres de béton sont mis dans la partie verticale de la boîte en L, puis on laisse le béton se reposer pendant une 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

on calcule le rapport (h_2/h_1) exprimé en %, le résultat est exprimé en termes de taux de remplissage.

Le béton est qualifié d'autoplacant si son taux de remplissage dépasse les 80 % ; si non la composition doit être revue [118].



Figure II.9 : Essai de L-Box.

C- Essai de J-Ring

Cet essai a pour but de vérifier l'aptitude des BAP à s'écouler dans un milieu frottement ferrailé.

L'équipement nécessaire à la conduite de cet essai est le même que celui de l'essai d'étalement, en ajoutant un anneau équipé de barres en acier (Figure II.10).

Le principe de l'essai est de placer le cône d'Abrams au centre du plateau métallique entouré du J-Ring, puis de remplir une quantité représentative de béton ; ensuite soulever le cône puis mesurer l'étalement obtenu ainsi que les hauteurs de bétons situés au centre du plateau ($h1$), à l'intérieur avant les barres (hai) et à l'extérieur (hri) après les barres du J-Ring. Ensuite on détermine hm et hr ; pour vérifier la relation (Equation II.3).

$$2hr - hm < 15 \text{ mm.} \quad (\text{II.3})$$

Tel que :

$$hm = \Sigma (h1 - hai) / 4$$

$$hr = \Sigma (hai - hri) / 4$$

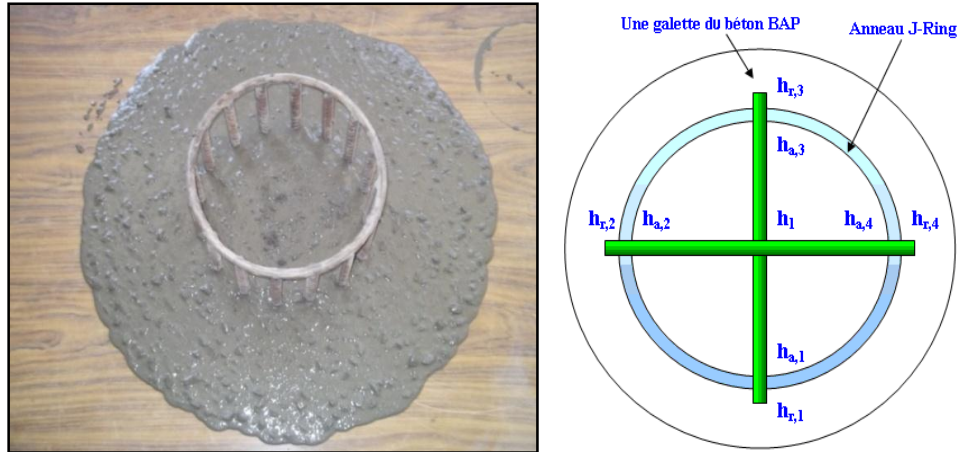


Figure II.10 : Essai de J-Ring.

D- Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à apprécier le risque de ségrégation statique des BAP. Il complète les essais permettant d'apprécier la mobilité en milieu confiné ou non (Figure II.11).

L'équipement nécessaire à la conduite de cet essai est composé des éléments suivants :

- ✓ Un tamis de 5 mm ;
- ✓ Un fond de tamis ;
- ✓ Une balance ;
- ✓ Un chronomètre.

Le protocole de mesure adopté est le suivant :

1. Peser le fond de tamis seul P_{fond} ;
2. Peser l'ensemble tamis muni de son fond vide P_t ;
3. Prélever une quantité de béton frais ($P_{échantillon} = 4,8 \pm 0,2$ Kg) d'un échantillon de 10 litres mis au repos pendant 15 minutes ;
4. Déverser cette quantité sur le tamis avec une hauteur de chute de 50 cm ;
5. Peser après 2 minutes la laitance qui a traversé le tamis : $P_{laitance}$.

On calcule le pourcentage en poids de laitance par l'Equation II.4.

$$\Pi = \frac{P_{laitance}}{P_{échantillon}} \times 100 \quad (II.4)$$

Avec

$$P_{laitance} = P_{fon} + laitance - P_{fon}$$

Le béton est qualifié d'autoplacant si sa stabilité est satisfaisante $0 \leq \Pi \leq 15\%$; si non la composition doit être revue [118].



Figure II.11 : Essai de stabilité au tamis.

E- Essai de ressuage

L'essai consiste à mesurer la quantité de liquide surnageant, remonté à la surface d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur, au bout de 3 heures (Figure II.12). La valeur limite conseillée est inférieure ou égale 3 ‰ en volume.

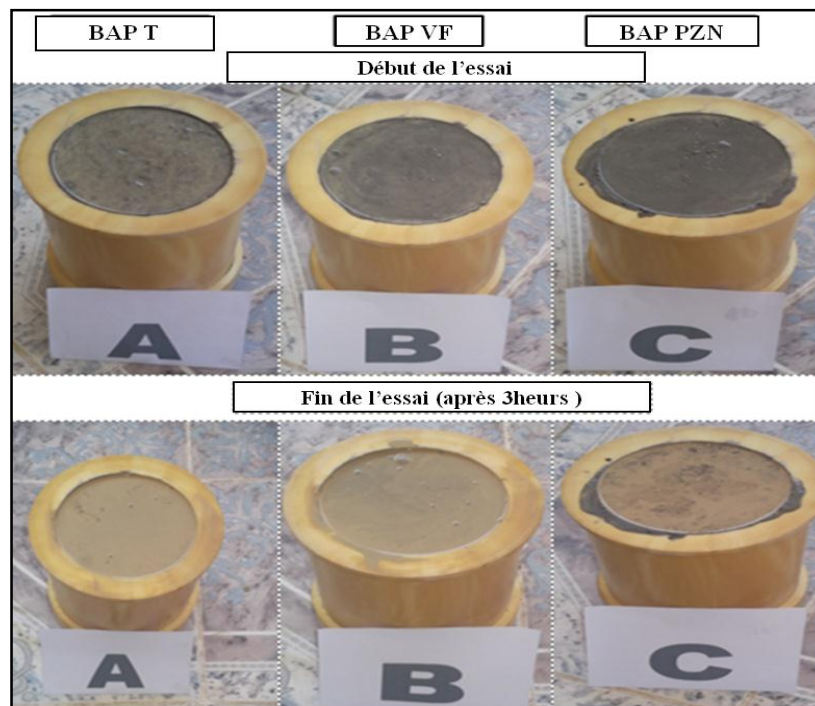


Figure II.12 : Essai de ressuage.

II.4.3 Essais de caractérisation à l'état durci

A- Vérification de la ségrégation (Essai de la colonne)

Un des moyens de contrôler la ségrégation statique d'un BAP [94], est de scier une éprouvette cylindrique, de 11 cm de diamètre et de 40 cm de hauteur, de béton durci (sous forme de disques) et observer la répartition des granulats dans les parties du haut, du milieu et du bas de l'éprouvette (Figure II-13).

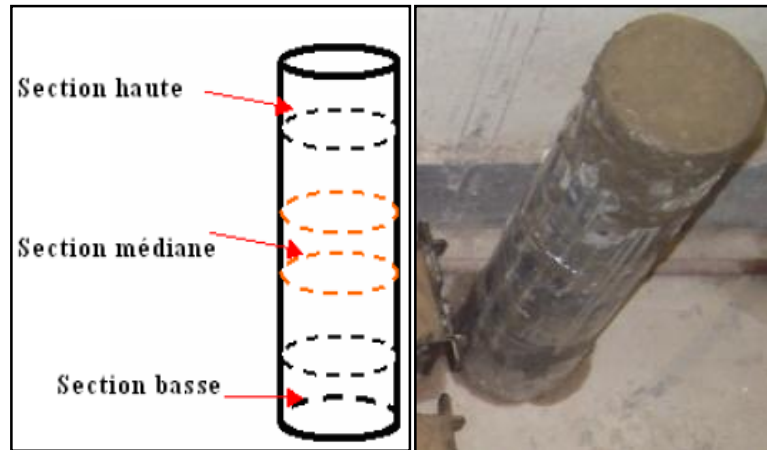


Figure II.13 : Essai de la colonne.

B- Résistance à la compression

Pour mesurer les résistances à la compression des BAP selon la norme NF P 18-406, des éprouvettes cubiques (7x7x7) cm³ (Figure II-14) ont été confectionnées dans des conditions thermohygrométriques ($T = 20 \pm 2$ °C, HR = 65%). Les essais ont été réalisés à 3, 7, 14, 28, 60, 90 et 150 jours.



Figure II-14 : Coulage des moules (7x7x7) cm³.

Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après le coulage et conservées sous l'eau dans une température de 20 ± 2 °C.

L'essai de compression simple, est réalisé au Laboratoire de Matériaux et Géotechnique de l'IGCMO (USTO) à l'aide d'une presse de capacité maximale de 3000 KN avec une vitesse de chargement d'environ de 0,5 MPa/s (Figure II-15).



Figure II-15 : La presse utilisée pour les écrasements.

II.4.4 Essais de durabilité

II.4.4.1. Attaques acides (HCl et H_2SO_4)

L'essai de la résistance aux attaques acides, consiste à suivre l'évolution de la masse et de la résistance mécanique et chimique d'échantillons immergés dans une solution saturée en acide (5% en volume).

Des essais d'immersion dans des solutions d'acide sulfurique (H_2SO_4) et d'acide chlorhydrique (HCl) ont été effectués pour évaluer la résistance des différentes formulations de BAP.

Les échantillons testés sont de forme cylindriques de 6.3 cm de diamètre et de 12.6 cm de hauteur ont été confectionnées (NF EN 196.1). Deux échantillons sont utilisés par formulation. L'essai a été réalisé après 90 jours conservation dans l'eau.

A l'échéance souhaitée, les cylindres ont été sortis de l'eau et laissés dans une ambiance de 23°C et de 50% hygrométrie relative pendant 30 minutes afin d'éliminer l'excès d'eau sur la surface des éprouvettes.

La masse initiale (M_0) des cylindres est déterminée avant leurs immersions dans des solutions acides [119].

Des solutions d'acides sulfuriques et d'acides chlorhydriques avec des concentrations initiales de 5% en volume ont été préparées dans des récipients résistants à l'acide (Figure II-16). Ces solutions ont été placées à une température ambiante de 23°C. Les échantillons sont alors disposés et espacés de 2 cm et recouvert d'environ 2 cm de solution acide (ASTM C 267) [120].

Un pH mètre numérique portatif a été utilisé pour surveiller les niveaux du pH tout les deux jours. Le pH maximum mesuré est de 2,0 pour le (H_2SO_4) et de 5,0 pour le (HCl).



Figure II.26: Les échantillons du béton immergés dans les solutions acides

La résistance des échantillons immergés dans les solutions acides est évaluée physiquement (variation de masse) et visuellement.

- **Variation de masse**

Selon la procédure de la norme ASTM C 267 [120] : les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce pour éliminer le béton altéré, puis on les laisse à l'air libre pendant 30 mn pour procéder ensuite à la pesée. Cette opération est effectuée après chaque semaine

d'immersion et cela pendant 12 semaines (ASTM C 267, [120]). Selon les recommandations des normes en vigueur, la solution acide est renouvelée après chaque nouvelle pesée.

La variation de la masse de chaque éprouvette est calculée à partir de l'équation II.5 :

$$VM \% = \left[\frac{M_0 - M_i}{M_0} \right] \times 100 \quad (II.5)$$

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).

- **Etude visuelle**

Une comparaison a été faite visuellement (à partir de photos numériques) entre l'état de chaque échantillon avant et après attaque acide.

II.4.4.2. Attaques sulfatiques externes (Na_2SO_4 et $MgSO_4$)

Les essais utilisés pour étudier la résistance des bétons aux attaques sulfatiques sont très divers [64]. Ils ont deux fonctions principales : dégrader le béton et quantifier cette dégradation. Etant donné que les sulfates sont essentiellement présents dans des solutions aqueuses, le principe de base des essais consiste le plus souvent à immerger des éprouvettes en béton dans une solution sulfatique.

Dans notre étude, des essais d'immersion dans la solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4) et de magnésium ($MgSO_4$) ont été effectués.

Selon la norme ASTM C1012-04 [121], 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 [122] qui recommande la correction de la solution déjà utilisée, par l'ajout d'une quantité d'acide sulfurique (0,1 N H_2SO_4) 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 chaque mois.

Pour évaluer la durabilité des BAP avec les différentes additions utilisées et de pouvoir évaluer l'effet de ces additions sur la résistivité aux attaques sulfatiques, on a réalisé des essais mécaniques, physiques et chimiques sur des éprouvettes de bétons immergées pendant 360 jours dans les solutions de 5 % de sulfate de sodium, 5% de sulfate de magnésium et dans l'eau douce (milieu de référence) (Figure II.17). Pour cela on a procédé comme suit :

- Suivi de l'évolution de la résistance à la compression ;
- Suivi de la variation de masse ;
- Analyse visuelle de l'état des éprouvettes



Figure II.17 : Epreuves de béton immergées dans les solutions sulfatiques

- **Suivi de variation de la masse**

Le suivi de la variation de la masse est effectué sur des éprouvettes cubiques ($7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$). Après démoulage, les éprouvettes sont mises directement dans l'eau saturée en chaux jusqu'au jour de l'essai.

Après 90 jours de conservation dans une solution saturée en chaux, trois échantillons de chaque formulation ont été mis dans trois milieux différents :

- ❖ 5% Na_2SO_4 sulfate de sodium ;
- ❖ 5% MgSO_4 sulfate de magnésium ;
- ❖ L'eau (témoin).

La mesure de la masse est réalisée durant 360 jours. 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. La variation de masse sous attaque sulfate est évaluée de même que la variation de masse sous attaques acides par l'équation II. 5.

Remarque : les trois échantillons de chaque formulation utilisés pour le suivi de la variation de masse seront aussi utilisés pour mesurer la résistance à la compression après 360 jours de conservation dans les milieux sulfatiques et le milieu témoin.

- **Suivi de la résistance à la compression**

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes cubiques de $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$. Trois échantillons de chaque formulation sont étudiés en utilisant une presse d'une capacité maximale de 3000 kN. Avant l'écrasement, l'éprouvette est retirée de son milieu de conservation, essuyée avec un tissu sec et laissée pendant 2 heures à l'air libre du laboratoire.

Les échéances prévues pour les échantillons immergés dans les solutions sulfatiques sont 60, 90, 180 et 360 jours.

- **Etude visuelle**

Pour évaluer la dégradation de chaque béton, une comparaison a été faite visuellement (à partir de photos numériques) avant et après 360 jours de conservation dans les milieux sulfatiques.

II.4.4.3. La carbonatation accélérée et naturelle

La carbonatation résulte de l'action du dioxyde de carbone atmosphérique sur le béton, et affecte la durabilité des structures en béton, car elle peut entraîner la corrosion des armatures.

La teneur en CO_2 de l'air ambiant est comprise entre 0,03 % et 1 %. C'est dans ces conditions que se produit la carbonatation naturelle. Les essais de carbonatation accélérée utilisent des mélanges gazeux nettement plus riches en CO_2 . La teneur la plus faible relevée pour ce type d'essais est de 3 % [123].

L'essai de carbonatation accélérée a été réalisé après 90 jours de conservation dans une ambiance humide. Les éprouvettes utilisées sont de forme prismatique, de dimensions de $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$. L'enceinte utilisée à cet effet est réglée à une humidité relative de (85%) et à une proportion volumique de 20 % de dioxyde de carbone (figure II. 18).



Figure II. 18 : L'enceinte de carbonatation accélérée utilisée dans notre étude

Le pré-conditionnement des corps d'épreuves utilisé suit le mode opératoire recommandé par AFPC-AFREM [124]. Deux éprouvettes de chaque formulation ont subi l'essai de carbonatation accélérée. Une éprouvette pour la mesure des épaisseurs du béton carbonaté et la deuxième a permis de suivre l'évolution de la masse au cours de l'essai.

Avant le démarrage de l'essai, 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 (espacés de 2 cm).

A chaque échéance (7, 14, 28 et 56 jours), les corps d'épreuve sont retirés de l'enceinte et les épaisseurs de béton carbonaté ainsi que les masses sont mesurées. Les mesures de l'épaisseur de béton carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphthaléine. Cette dernière révèle l'interface entre la zone saine et la zone carbonatée (Figure II.19).

La valeur de l'épaisseur de carbonatation correspondant à une échéance donnée est la moyenne des mesures effectuées sur les quatre faces de l'échantillon.

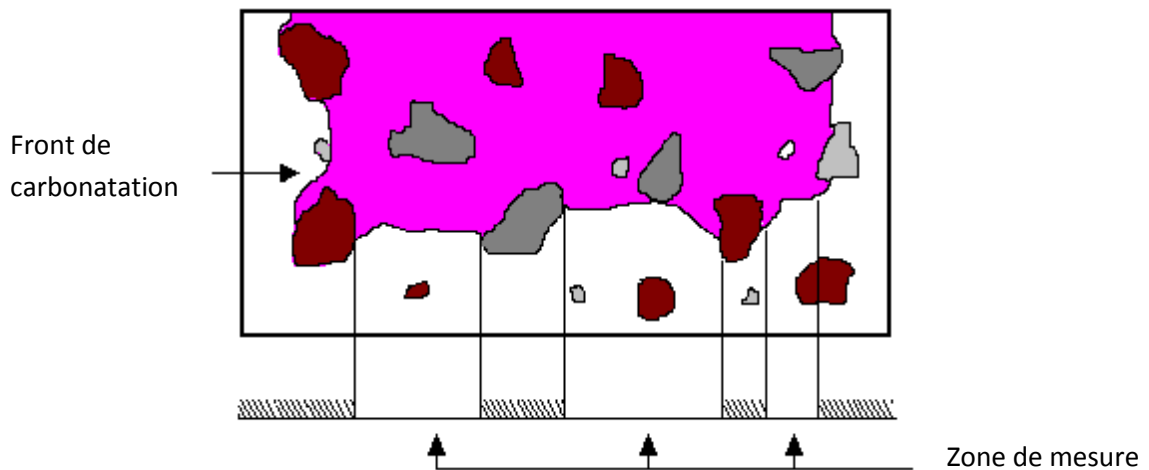


Figure II.19 : Schéma illustrant le principe des mesures

Pour pouvoir comparer les résultats de la carbonatation accélérée et celle naturelle, trois éprouvettes supplémentaires ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) ont été confectionnées pour chaque formulation. Les éprouvettes ont été placées à l'air libre au laboratoire pour suivre l'évolution de la carbonatation naturelle. L'échéance de mesure pour cette ambiance de conservation est de 12 mois (360 jours).

II.5. CONCLUSION

Ce travail expérimental a pour objectif en premier lieu de mettre en évidence l'influence des ajouts pouzzolaniques (vase de Fergoug et Chorfa et pouzzolane de Béni-Saf) sur le comportement physico – mécaniques (chaleur d'hydratation et résistance) des mortiers. Il vise en second lieu à caractériser les BAP à l'état frais conformément aux normes AFGC [6] et étudier leurs performances mécaniques et leur durabilité envers l'attaque des acides, des sulfates et du CO_2 .

Nous avons adopté pour toutes les formulations le même rapport Eau/Ciment, le même squelette granulaire et le même volume de pâte.

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



ANALYSE ET INTERPRETATION

DES RESULTATS



CHAPITRE 1
RESULTATS DES ESSAIS
A L'ETAT FRAIS

CHAPITRE 1 : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT FRAIS

III.1 INTRODUCTION

Cette partie présente, les résultats des travaux expérimentaux qui ont été réalisés dans le cadre de notre recherche, ainsi que leur interprétations. Il s'agit des essais de caractérisation propres aux BAP frais. Des essais de prise ont été menés afin de mettre en évidence l'effet de la vase sur les temps de début de prise, de fin de prise et les temps de prise des mortiers dont ils sont composés.

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 ce dernier essai, il s'agit de mesurer le 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}) matérialisés sur le fond de la boîte en L, qui sont mesurés pour estimer la viscosité du béton.

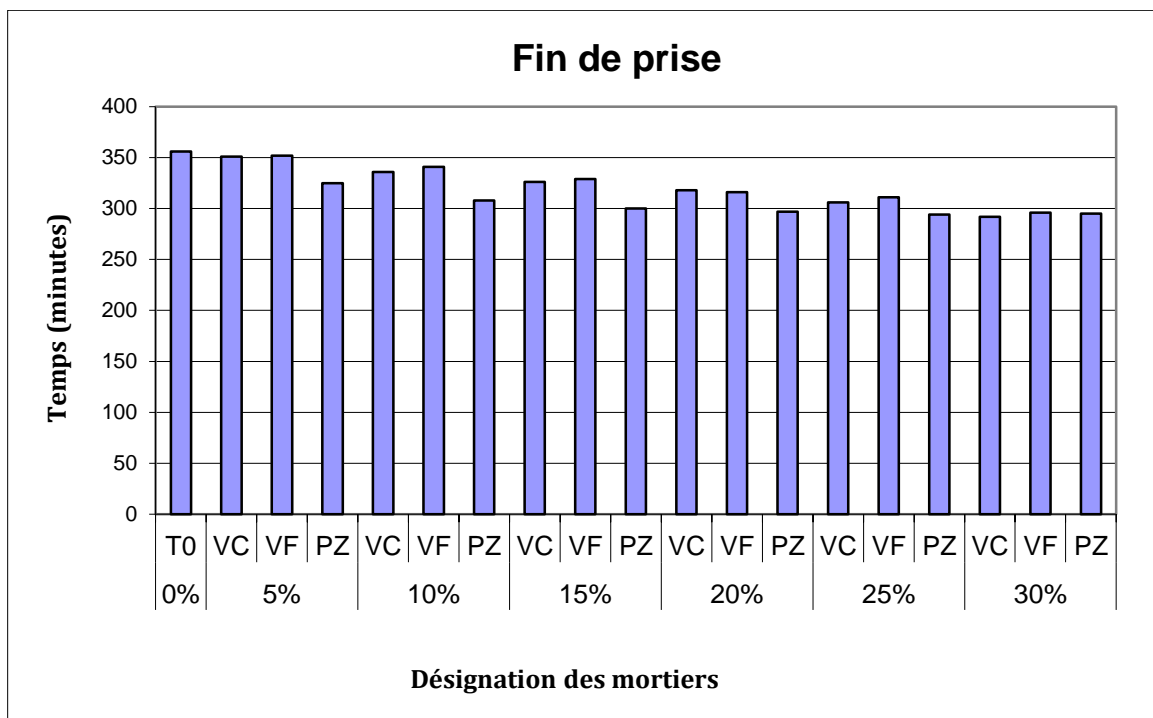
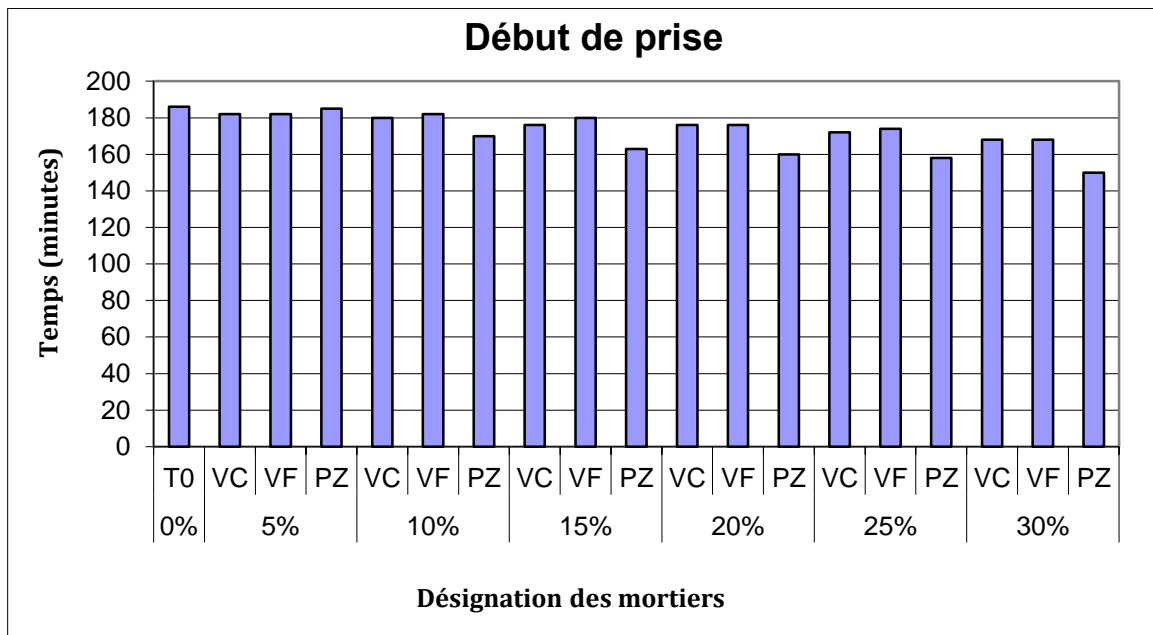
III.2 PRISE DES PATES A BASE DES AJOUTS MINERAUX

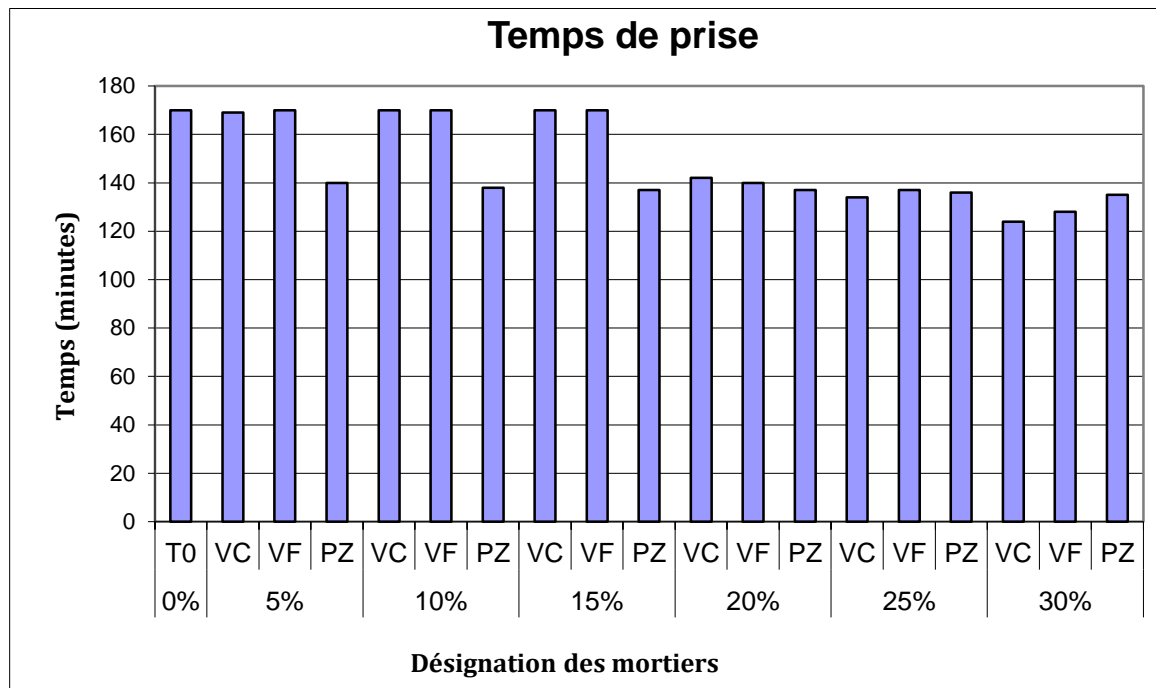
Le tableau III.1 et la figure III.1 donne les valeurs des temps de début de prise (a), de fin de prise (b) et les temps de prise (c), mesurés sur des pâtes témoin et celles contenant 5, 10, 15, 20, 25 et 30% de vase de Chorfa, de Fergoug et de la Pouzzolane par rapport au dosage en volume du ciment.

	Pourcentage d'ajouts	Début de prise (heures)	Fin de prise (heures)	Temps de prise (heures)
Témoin	0%	03:06	05:56	02:50
Vase Chorfa	5%	03:02	05:51	02:49
	10%	03:00	05:36	02:50
	15%	02:56	05:26	02:50
	20%	02:56	05:18	02:22
	25%	02:52	05:06	02:14
	30%	02:48	04:52	02:04
Vase Fergoug	5%	03:02	05:52	02:50
	10%	03:02	05:41	02:50
	15%	03:00	05:29	02:50
	20%	02:56	05:16	02:20
	25%	02:54	05:11	02:17
	30%	02:48	04:56	02:08
Pouzzolane	5%	03:05	05:25	02:20

	10%	02:50	05:08	02:18
	15%	02:43	05:00	02:17
	20%	02:40	04:57	02:17
	25%	02:38	04:54	02:16
	30%	02:30	04:45	02:15

Tableau III.1 : Les temps de début de prise, de fin de prise et les temps de prise des différentes pâtes.





(c)

Figure III.1 : (a, b et c) Les temps de prise des pâtes à base de vase calcinée de Chorfa (VC), vase de Fergoug (VF) et pouzzolane (PZ)

A noter que le remplacement de 10 à 30 % du ciment par la pouzzolane naturelle augmente la quantité d'eau nécessaire pour l'obtention de la consistance normale du liant. Ceci est dû probablement à la grande surface spécifique présentée par le mélange et donc un fort appel aux molécules d'eau afin de mouiller toute la surface est constaté.

Concernant la prise et d'après les résultats de la figure III.1, il apparaît que l'ajout de la vase affecte légèrement les temps de prise puisqu'un écart de 46 minutes est enregistré entre la pâte témoin et celle dont 30% de ciment ont été remplacés par la vase de Chorfa. On note par ailleurs des temps de prise équivalents pour les pâtes à base de 0, 5, 10 et 15% de vase quelque soit sa provenance.

Par contre en comparant les temps de début et de fin de prise, nous remarquons que ces derniers diminuent avec l'augmentation des dosages en ajouts ce qui présente un intérêt en cas de bétonnage par temps froid [1].

III.3 MANIABILITE DES MORTIERS

La maniabilité des mortiers caractérisés par un rapport E/C et un volume de pâte constants a été gardée commune aux alentours des 8 secondes.

Les dosages du plastifiant introduit sont donnés par les tableaux III.2 et III.3.

Pourcentage de l'ajout en Vases	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Ciment (g)	450	439,8	429,9	420,6	411,6	402,9	394,7
Sp/C (%)	0	0.10	0.25	0.46	0.67	0.92	1.27
Sp (g)	0	0.44	1.07	1.93	2.76	3.71	5.01

Tableau III.2 : Dosages du plastifiant des mortiers à base de vase calcinée de Chorfa et Fergoug

Pourcentage de l'ajout en Pouzzolane	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Ciment (g)	450	439,8	429,9	420,6	411,6	402,9	394,7
Sp/C (%)	0	0.05	0.15	0.35	0.6	0.8	1.25
Sp (g)	0	0.22	0.64	1.47	2.47	3.22	4.93

Tableau III.3 : Dosages du plastifiant des mortiers à base de pouzzolane naturelle

D'après les résultats de la figure III.2, nous remarquons que le pourcentage de plastifiant augmente avec l'augmentation des dosages en ajouts, en comparant les résultats les deux ajouts vase calcinée et la pouzzolane naturelle on distingue une légère supériorité de dosage en plastifiant en faveur de la vase.

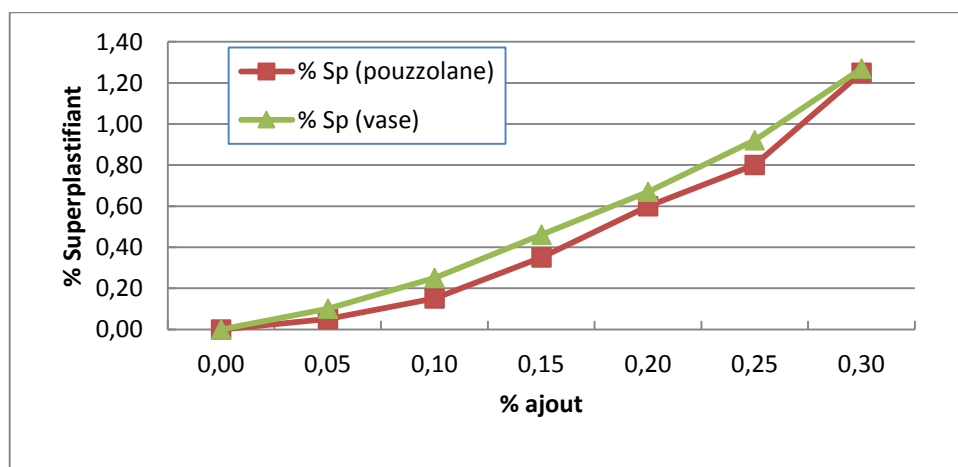


Figure III.2 : Evolution du pourcentage en Sp des mortiers à base de pouzzolane ou de vase en fonction du dosage de l'ajout

La maniabilité des mortiers pouzzolaniques diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par de la pouzzolane naturelle et de la vase calcinée. Pour garder une maniabilité plus ou moins constante, il a fallu augmenter la quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'un mélange maniable et ouvrable.

Cela prouve que l'augmentation du taux de la pouzzolane naturelle et de la vase accroît sensiblement la demande en eau. La croissance de la demande en eau est principalement attribuée à l'augmentation progressive de la surface spécifique des liants pouzzolaniques.

III.4 CARACTERISATION DES BAP FRAIS

Les résultats des essais, de caractérisation des BAP à l'état frais sont représentés dans le Tableau III.4.

Béton Essai		BAP T	BAP VC	BAP VF	BAP PZ
Etalement	Ø (cm)	70	70	68	68
	t ₅₀ (s)	3.56	3.75	3.83	3.69
Boîte en L	h ₂ /h ₁ (%)	89	95	83	86
	t ₂₀ (s)	2.39	2.56	2.58	2.41
	t ₄₀ (s)	3.76	3.38	3.98	3.80
Essai de J-Ring	Ø (cm)	62	59	58	59
	h _r (mm)	7.3	7.2	6.9	6.9
	h _m (mm)	5.4	5.3	5.1	5.0
	2h _r -h _m (mm)	9.2	9.1	8.7	8.8
Stabilité au tamis	%	6.91	4.52	5.11	5.87
Essai de ressuage	‰	1.21	1.10	1	1.09

Tableau III.4 : Les résultats des essais de caractérisation à l'état frais

➤ *Etalement*

Le tableau III.4 montre que les quatre BAP testés vérifient la condition d'étalement imposée par la recommandation de l'AFGC ($60 \text{ cm} \leq \text{Ø} \leq 75 \text{ cm}$) [2] (Figure III.3).

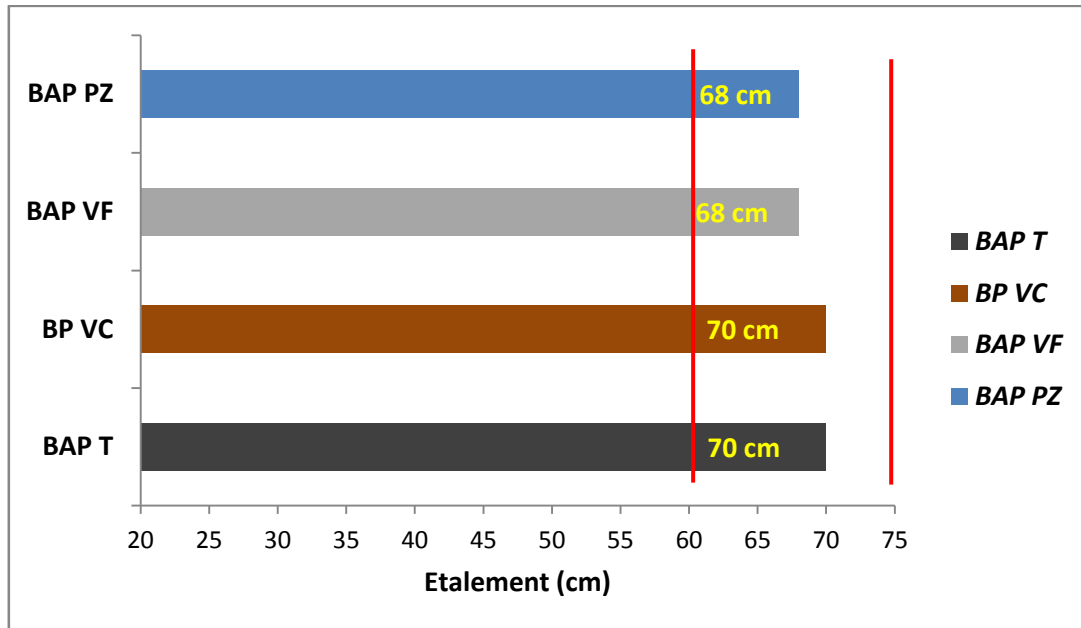


Figure III.3: Valeurs d'étalements des quatre BAP.

Les valeurs d'étalements obtenus (70 cm pour le BAP T et BAP VC et de 68 cm pour le BAP VF et BAP PZ) classent ces bétons comme des bétons autoplaçants dans un milieu non confiné.

Les valeurs de t_{50} obtenues sont conformes aux spécificités les plus courantes d'un BAP à l'état frais ($3s \leq t_{50} \leq 5s$) [2] (Figure III.4).

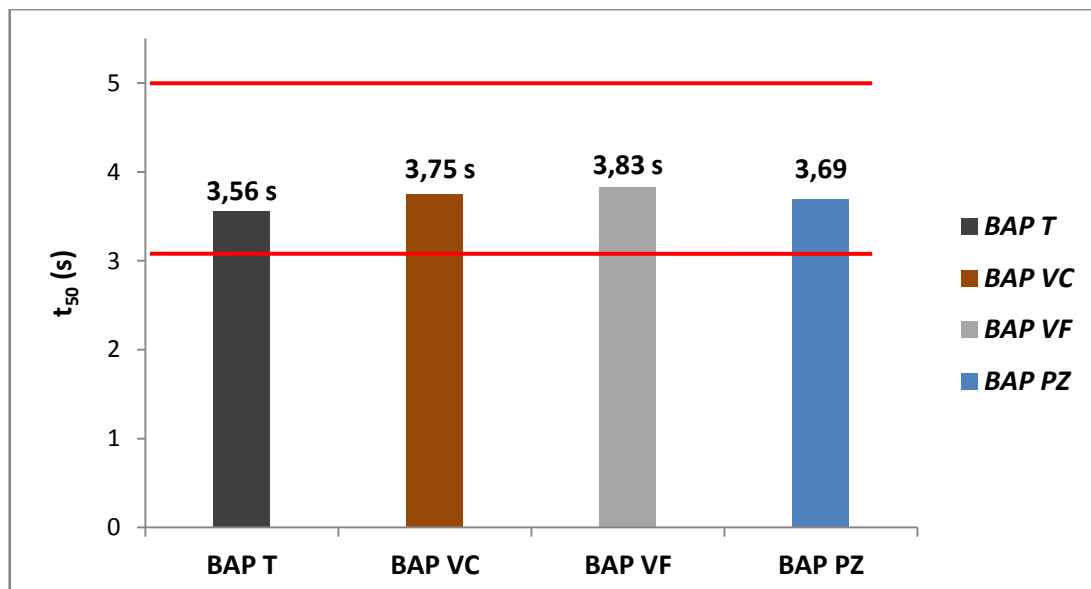


Figure III.4: Valeurs de t_{50} des quatre BAP.

Pour les quatre compositions de BAP, l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était absente. 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 (voir partie II Figure II.8).

➤ **Boîte en L**

La ségrégation dynamique des BAP est caractérisée par l'essai de la boîte en L, on peut voir aussi que toutes les formulations présentent des taux de remplissage supérieur à 80 % (Figure III.5). Par conséquent ces bétons ont une bonne mobilité dans un milieu confiné et cela malgré les armatures qui font obstacle.

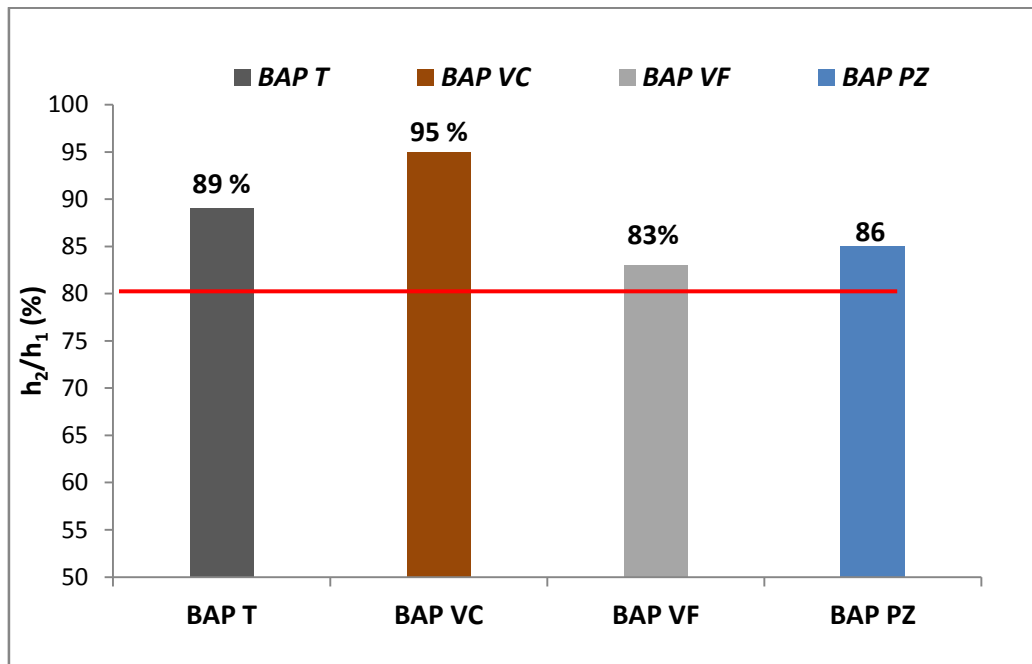


Figure III.5: Les taux de remplissage des trois BAP.

➤ **J-Ring**

L'essai de J-Ring permet d'apporter des informations sur la déformabilité restreinte, et l'homogénéité du mélange. Sur ce point, aucun problème n'est à signaler puisque les quatre BAP ne présentent aucun blocage à travers les armatures (voir partie II Figure II-10) et satisfont la condition de l'essai (Figure III.6).

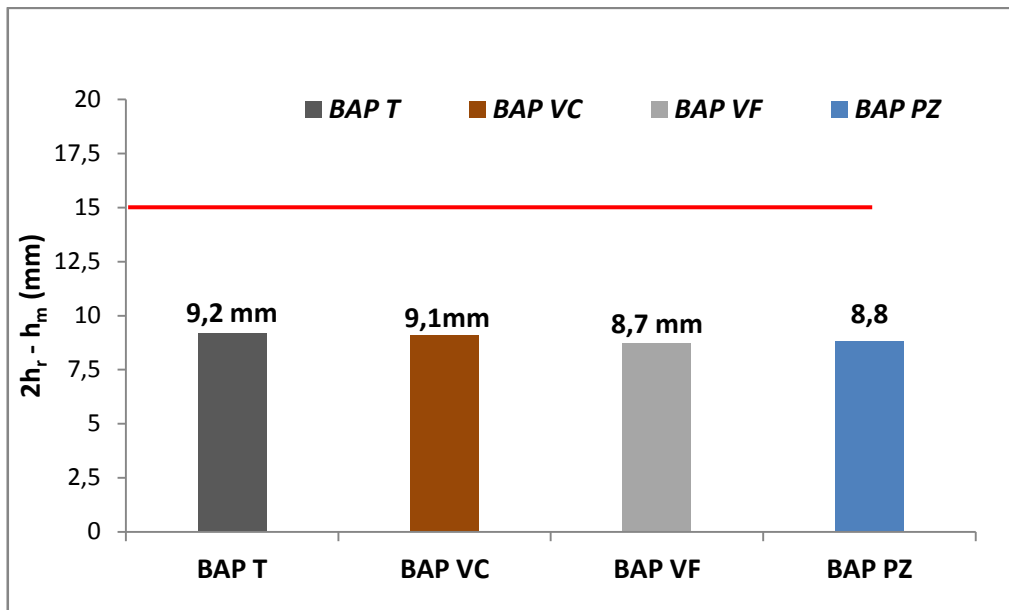


Figure III.6 : Résultats obtenu d'après l'essai de J-Ring.

➤ *Stabilité au tamis*

Sur la ségrégation statique, les résultats issus des essais de stabilité au tamis montrent que les quatre compositions testées ont une stabilité satisfaisante ($0 \leq \Pi \leq 15\%$) (Figure III.7).

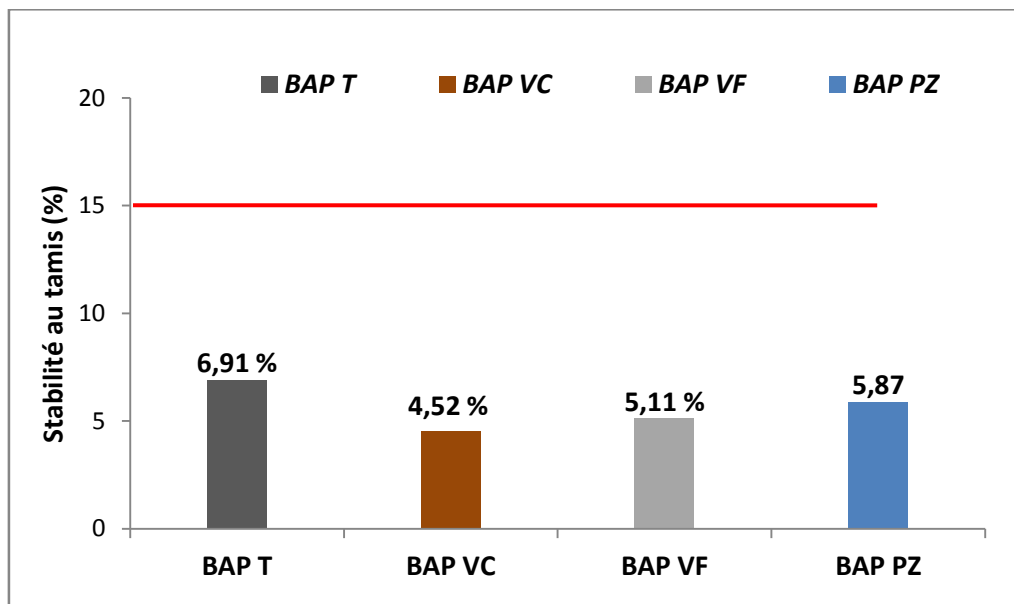


Figure III.7: Taux de ségrégation des quatre BAP.

➤ *Ressuage*

Tous nos bétons respectent la condition de l'essai du ressuage conseillé dont la valeur doit être inférieure ou égale à 3% en volume (Figure III.8).

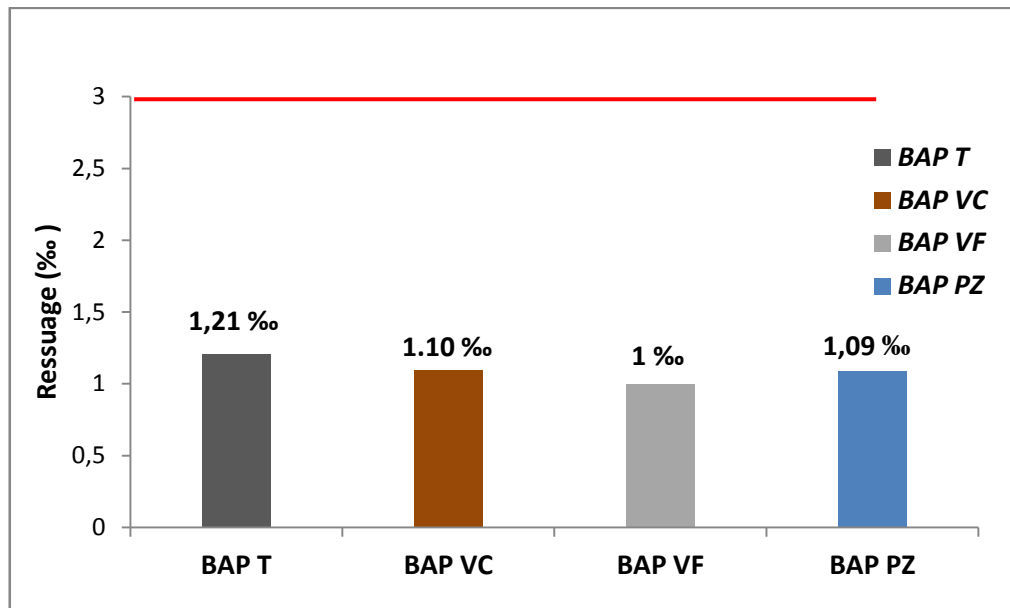


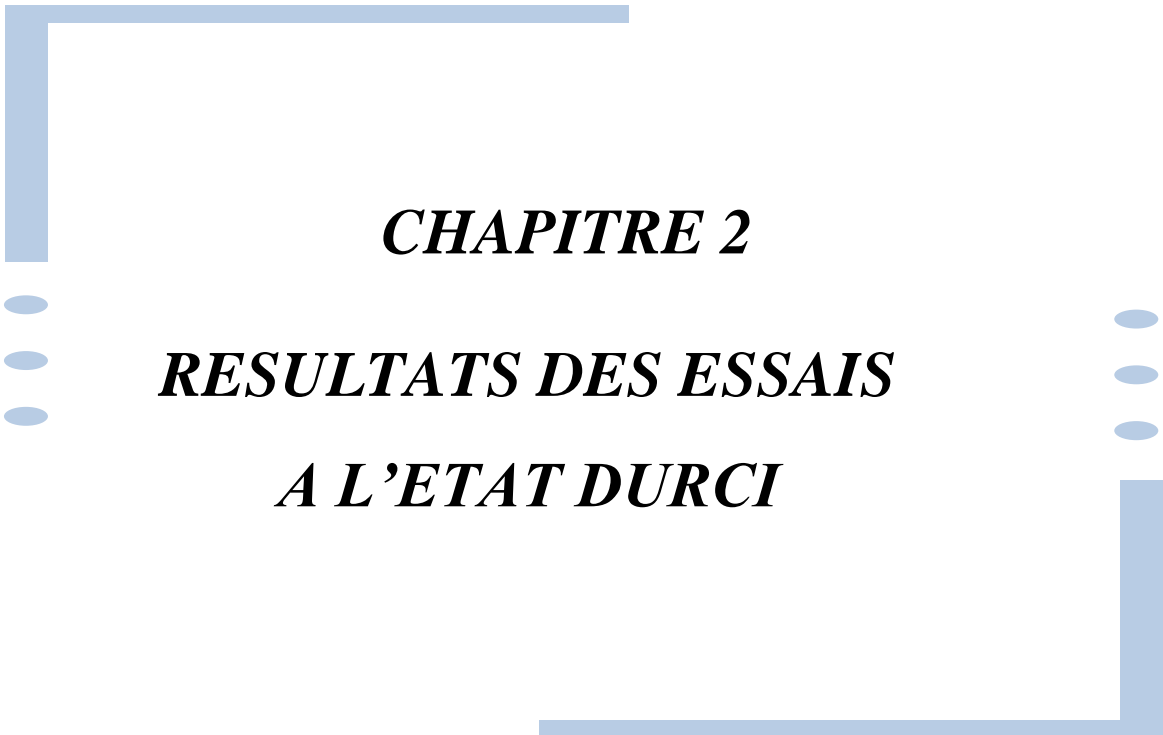
Figure III.8: Ressuage des quatre BAP.

III.5 CONCLUSION

Les essais menés à l'état frais sur pâtes avaient pour objectif la détermination des valeurs des rapports E/C par l'essai de consistance qui a révélé que la présence de la pouzzolane naturelle et surtout la vase calcinée implique une augmentation du besoin en d'eau.

Les résultats des mesures de temps de prise des différentes pâtes ont montré que l'incorporation des ajouts, en particulier la vase calcinée, contribue à l'accélération de la prise.

Les essais de caractérisation des BAP à l'état frais ont montré qu'ils répondent aux spécifications de l'AFGC.



CHAPITRE 2
RESULTATS DES ESSAIS
A L'ETAT DURCI

CHAPITRE 2 : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT DURCI

III.1 INTRODUCTION

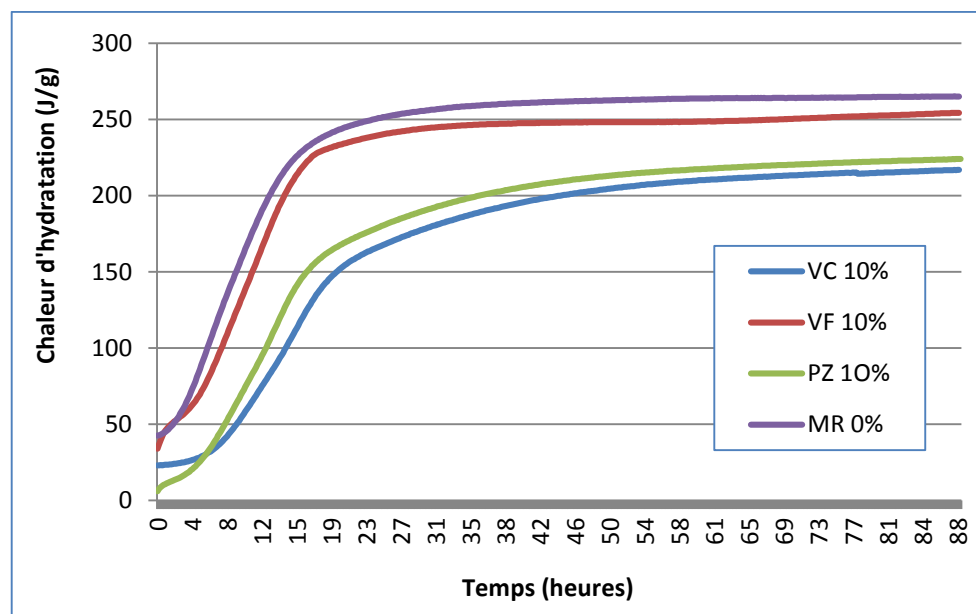
Les résultats présentés dans ce chapitre caractérisent les propriétés mécaniques des mortiers et bétons autoplaçants étudiés à savoir ; résistance mécanique en compression et leur évolution dans le temps, ainsi qu'un contrôle de ségrégation afin de visualiser en œil vif la répartition des granulats dans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

Dix-neuf formulations de mortier ont ainsi été optimisées, mises en œuvre et élargis sur les bétons autoplaçants. Elles ont été ensuite caractérisées par des essais de compression simple à différentes échéances (3, 7, 28, 60, 90 et 180 jours) pour les mortiers et (3, 7, 14, 28, 60, 90 et 150 jours) pour les bétons autoplaçants.

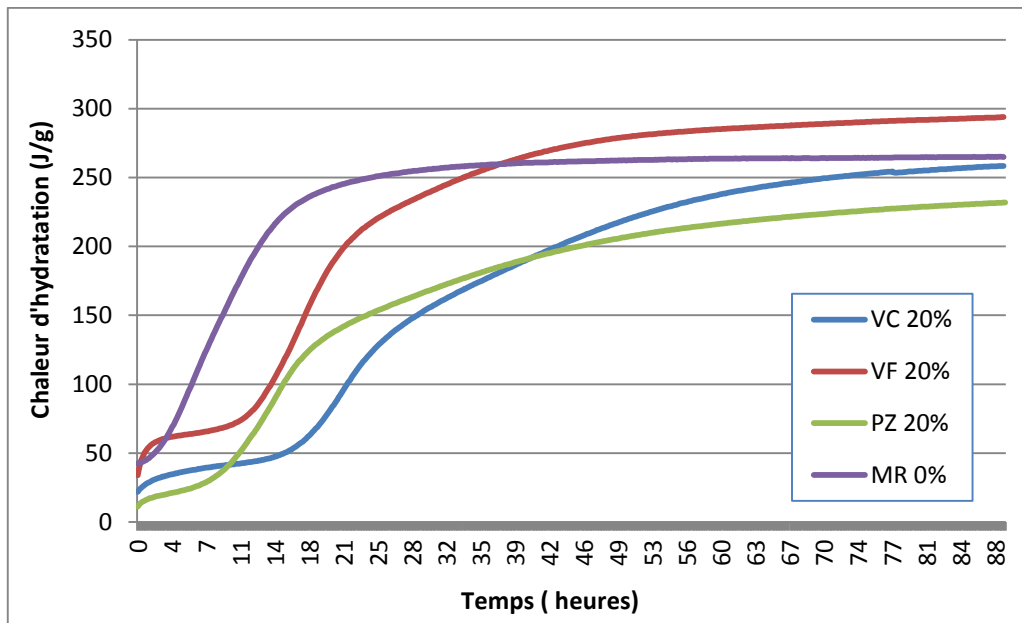
III.2. RESULTATS EN TERMES DE CHALEUR D'HYDRATATION

III.2.1 Quantité de chaleur

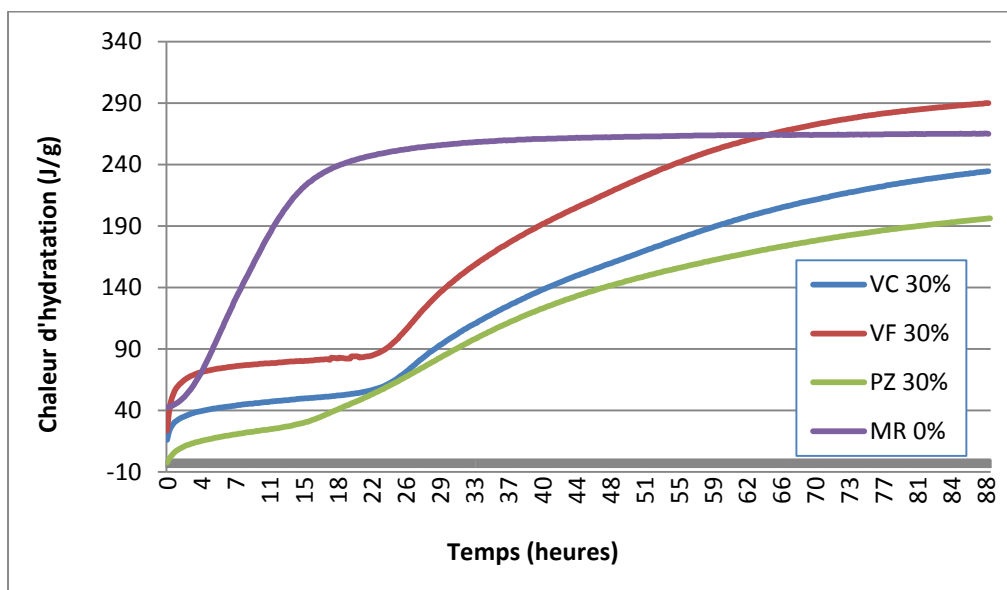
La figure III.9 (a-b-c) représente la chaleur dégagée en fonction du temps des mortiers à base de 10, 20 et 30% de vase calcinée (Chorfa et Fergoug) et de la pouzzolane naturelle et d'un mortier de référence.



(a)



(b)



(c)

Figure.III.9 (a-b-c) Évolution de la chaleur d'hydratation en fonction du temps des mortiers à base de 10,20 et 30% de vase calcinée et de pouzzolane naturelle.

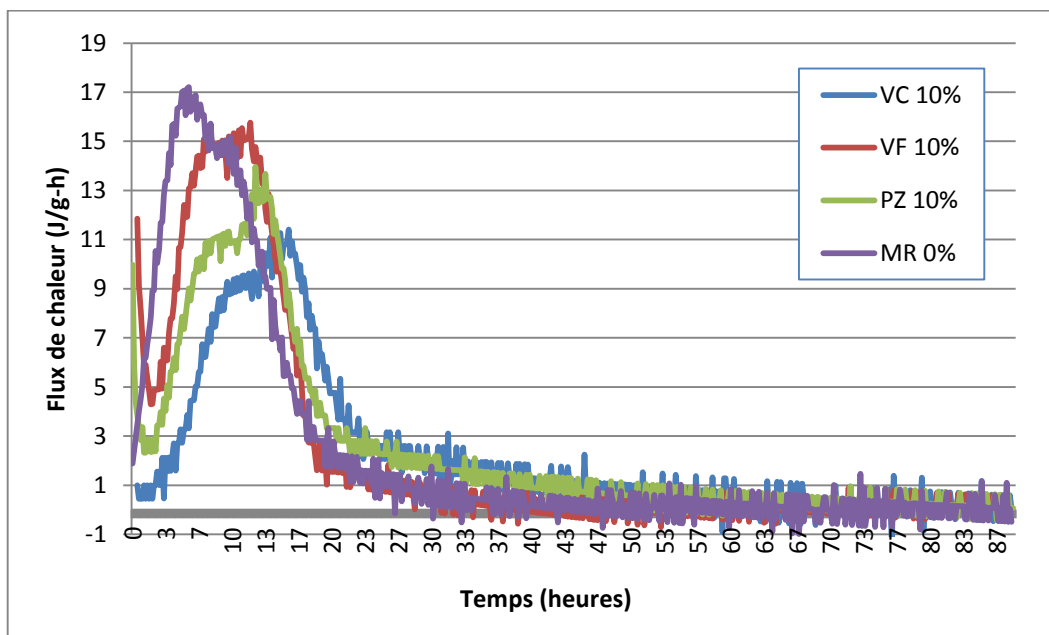
La chaleur totale évaluée varie de la même manière pour tous les types d'ajout. Aux premières heures d'hydratation la chaleur dégagée diminue avec l'augmentation d'ajout et par conséquent avec l'accroissement du taux d'adjuvant qui retarde la réaction d'hydratation. Par contre au delà de 22 heures, la chaleur dégagée augmente avec l'augmentation d'ajout.

La substitution de 20% de ciment par la vase de Chorfa procure une chaleur plus importante que celle de 20% de vase de Fergoug et de pouzzolane naturelle à 88 heures. Cela est peut être dû au caractère lent de la réaction pouzzolanique dont le déclenchement est très tardif, comparée à la réaction d'hydratation du C_3S .

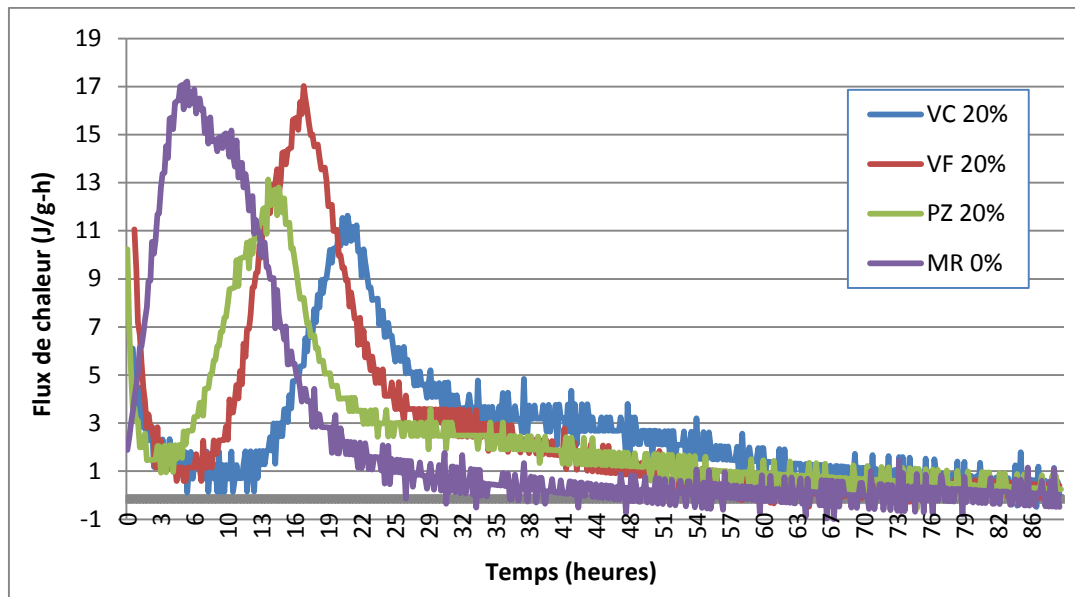
La réaction pouzzolanique est lente, parce qu'avant son déclenchement, il faut d'abord que la portlandite se forme suite à l'hydratation du ciment Portland. Jian. S et al. [125] ont étudié l'effet des additions minérales, telles que les cendres volantes, la fumée de silice et le laitier de haut fourneau avec différents pourcentages, sur la chaleur d'hydratation des mortiers. Ils ont conclu que le processus d'hydratation endothermique du mortier est très influencé par le remplacement d'une partie de ciment par l'un de ces ajouts.

III.2.2 Taux de flux de chaleur des mortiers

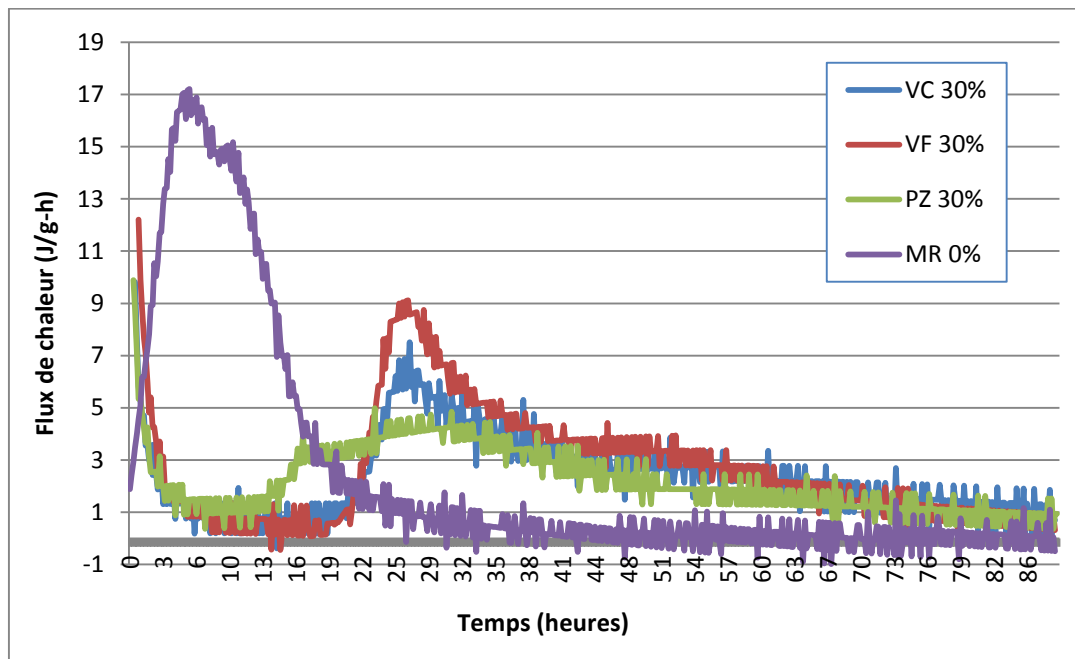
La figure III.10 (a-b et c) montre le taux de dégagement de chaleur des mortiers à différents dosages (10, 20 et 30%) de vase calcinée et de pouzzolane naturelle.



(a)



(b)



(c)

Figure.III.10 (a-b-c) Évolution du flux de chaleur en fonction du temps des mortiers à base de 10, 20 et 30% de vase calcinée et de pouzzolane naturelle.

L'évolution du flux de chaleur présentée dans les courbes ci-dessus présente deux pics. Le premier pic correspond aux réactions initiales, qui suivent le mélange du ciment avec de l'eau. Ce pic initial est suivi par la période dormante, avec un dégagement de chaleur très faible accompagné d'une sursaturation progressive de la chaux. Ensuite, la période d'accélération commence avec la précipitation de la portlandite, et le taux de dégagement de chaleur

augmente rapidement jusqu'à ce qu'il atteigne le pic principal avec la formation d'hydrosilicate et d'ettringite supplémentaires [126].

Comme le montre la figure III.10 (b et c), la quantité de plastifiant et le manque d'eau disponible pour hydrater le liant provoque un effet retardateur sur l'hydratation. Lorsque le taux de plastifiant passe de 0.6% pour le mortier à base de 20% d'ajout à 1.27% pour le mortier à base de 30% d'ajout, la durée de la période dormante est prolongée de 4 à 22 heures. On remarque une réduction de la hauteur du pic principal et des surfaces sous les courbes d'évolution de chaleur avec l'augmentation du dosage en ajout et en adjuvant.

III.3 RESISTANCES A LA COMPRESSION DES MORTIERS

Des éprouvettes 4x4x16 cm de mortier témoin et à base de vase et de pouzzolane (5, 10, 15, 20, 25 et 30%) ont été testées à la compression à 3, 7, 28, 60, 90 et 180 jours. Les évolutions des résistances à la compression en fonction du temps et du dosage en vase et en pouzzolane sont illustrées par les figures III.11, 12 et 13.

Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute.

Il apparaît que les mortiers (5, 10, 15, 20 et 25%) de vase se distinguent légèrement du mortier incorporant 30% de vase aux jeunes âges (3 et 7 jours) en développant des résistances qui s'approchent de celles du mortier témoin (sans vase).

De 28 à 180 jours, les mortiers développent des résistances à la compression supérieures à celles du mortier témoin et évoluent proportionnellement aux pourcentages de vase. En effet à 180 jours, les mortiers à 20 et 25% de vase de Chorfa développent un gain de résistance d'environ 29% par rapport au mortier témoin. Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et qui se développe tardivement. Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive qui se situe dans la partie vitreuse de la vase calcinée et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libéré par l'hydratation du ciment ce qui donne à la vase la propriété de fixer la chaux. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances [49].

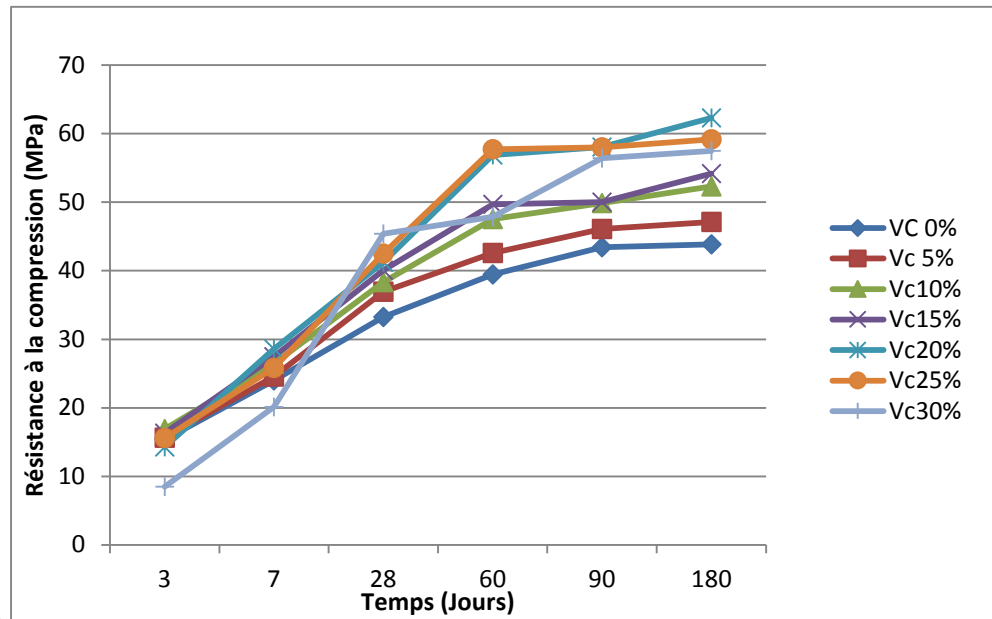


Figure III.11 : Evolution des résistances mécaniques des mortiers à base de vase de Chorfa

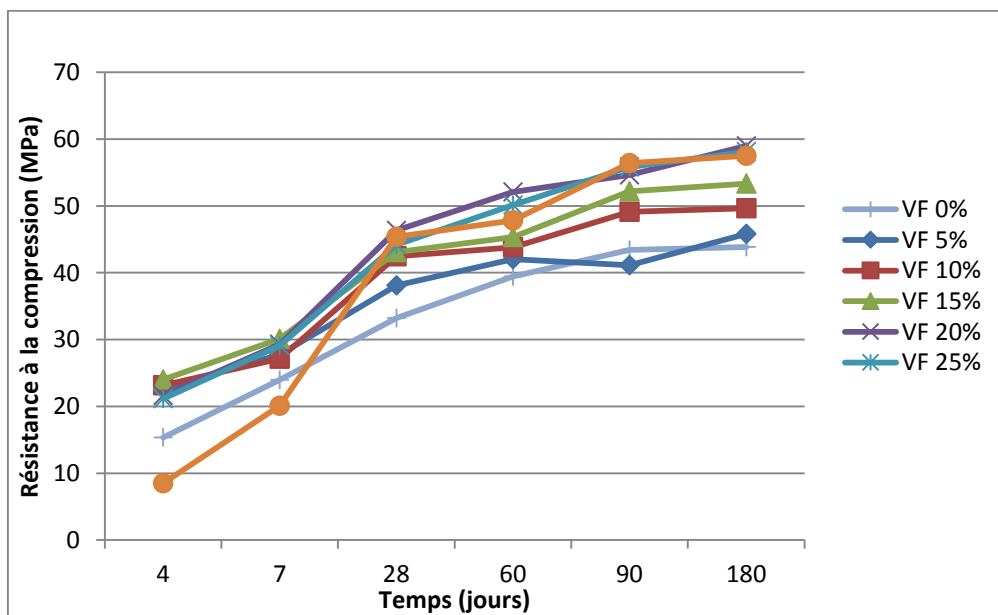


Figure III.12 : Evolution des résistances mécaniques des mortiers à base de vase de Fergoug

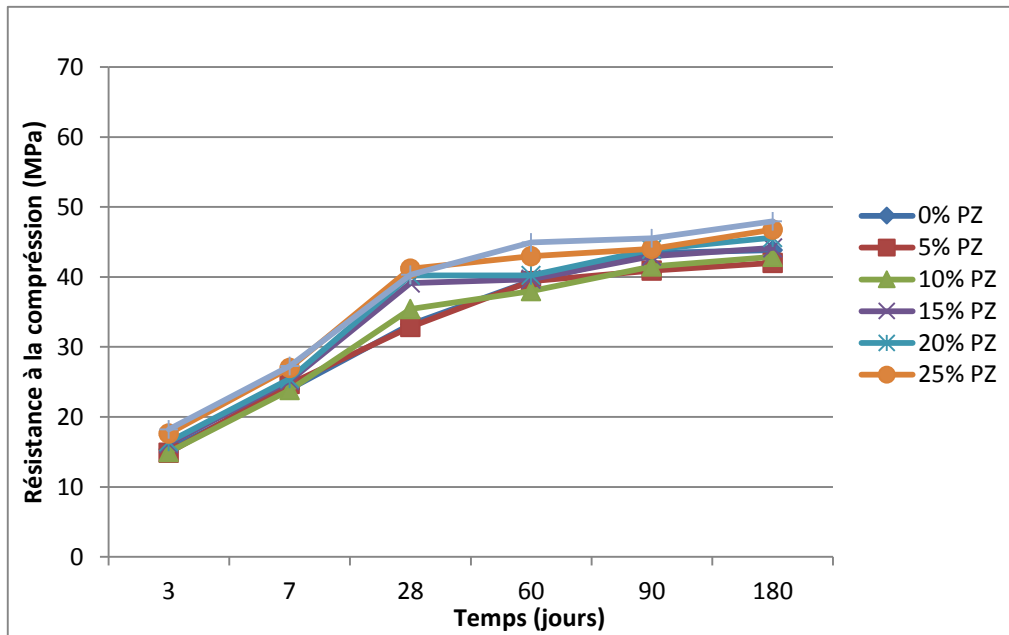


Figure III.13 : Evolution des résistances mécaniques des mortiers à base de pouzzolane

La figure III.13 illustre l'influence de la pouzzolane sur les valeurs des résistances en compression des mortiers dans lesquels elle a été substituée partiellement au ciment.

L'effet pouzzolanique pour les mélanges à base de 20, 25 et 30% de pouzzolane est remarquable à partir de 60 jours pour les mêmes raisons relatives à la réaction pouzzolanique.

Comparaison des résultats :

Les évolutions des résistances à la compression en fonction du temps, du type de vase et des dosages en vase et en pouzzolane sont illustrées par les figures III.14, 15 et 16.

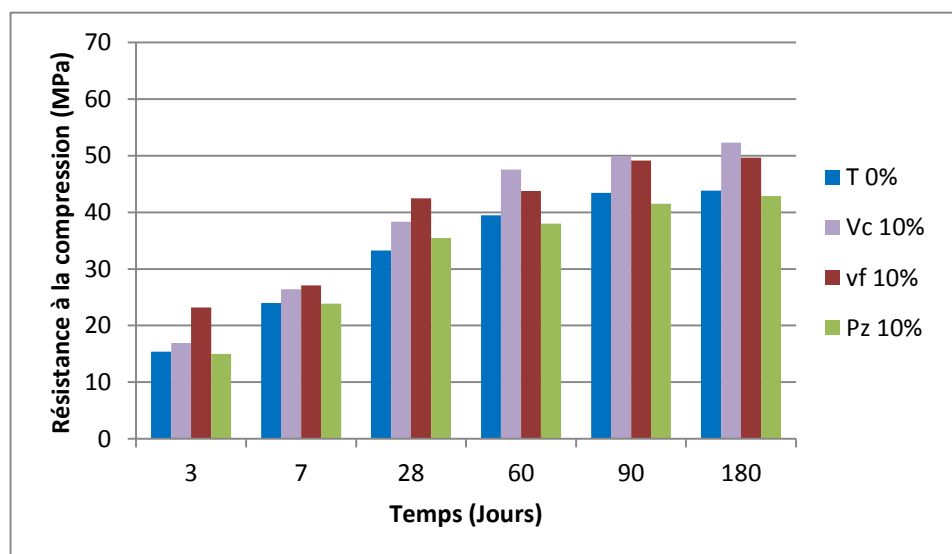


Figure III.14 : Comparaison des évolutions des résistances en compression des mortiers à 10% de vase de Chorfa, de Fergoug et de pouzzolane naturelle.

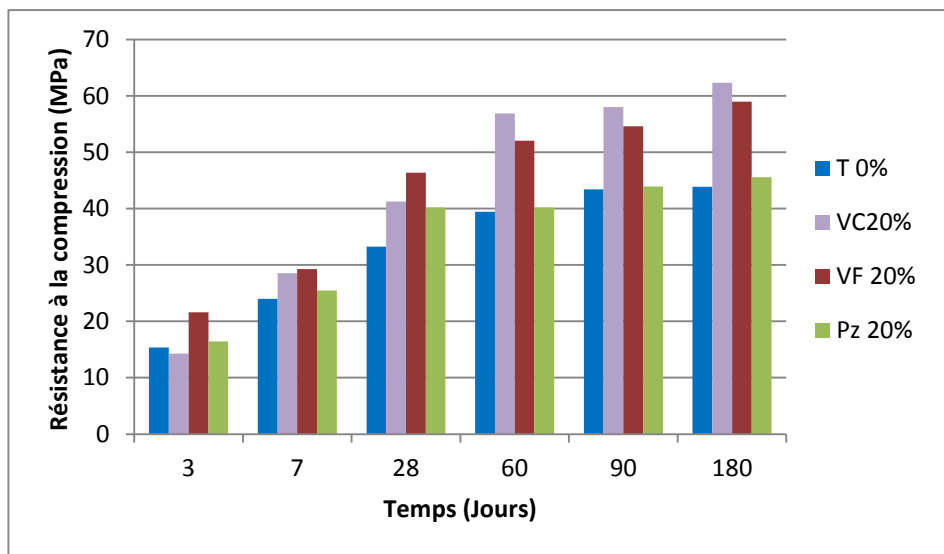


Figure III.15 : Comparaison des évolutions des résistances en compression des mortiers à 20% de vase de Chorfa, de Fergoug et de pouzzolane naturelle.

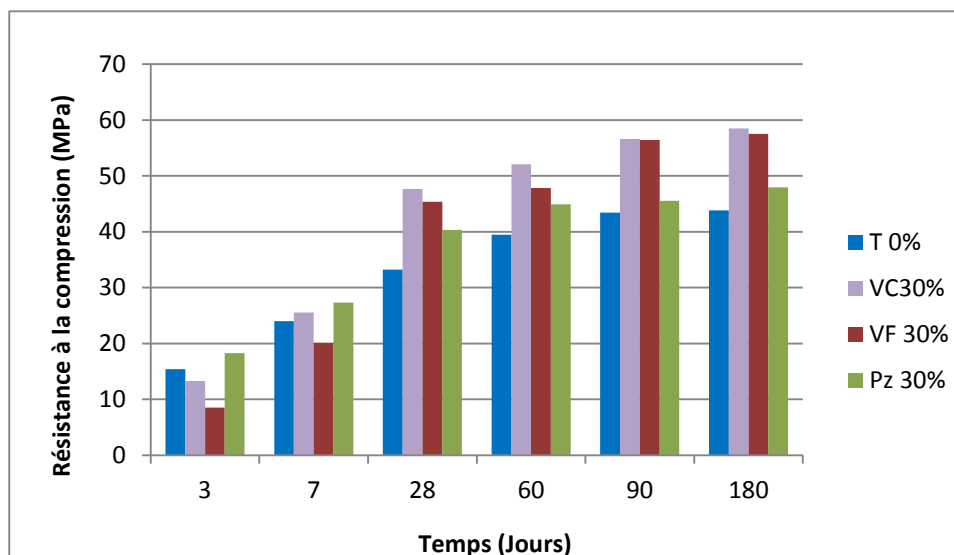


Figure III.16 : Comparaison des évolutions des résistances en compression des mortiers à 30% de vase de Chorfa, de Fergoug et de pouzzolane naturelle.

On remarque d'après ces figures que les performances mécaniques se développent durant les premiers jours de l'hydratation, plus rapidement pour les mortiers à base de 10 et 20 % des vases que pour le mortier témoin ce qui n'est pas le cas des mortiers à 30 % de vases.

Au jeune âge et jusqu'à 28 jours toutes les résistances en compression des mortiers à base de vase de Chorfa (10 et 20 %) restent inférieures à celles du mortier à base de vase de Fergoug.

Au-delà de 28 jours les résistances des mortiers incorporant les vases dépassent celles des mortiers pouzzolaniques et témoin.

A l'échéance de 180 jours, les mortiers à base de vase de Chorfa développent des résistances à la compression supérieures à celles du mortier à base de vase de Fergoug. Cela veut dire que le mortier avec les dosages de 5% et 10 et même 30% de vase de Chorfa donne à long terme des performances mécaniques supérieures à celle du mortier à base de vase de Fergoug.

Par ailleurs en comparant les résultats relatifs à l'influence de la provenance de la vase, il apparaît que la vase de Chorfa influe positivement et de façon plus prononcée sur les résistances que la vase du barrage de Fergoug.

III.4 CARACTERISATION DES BAP DURCI

III.4.1. 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 figures III.17.18 et 19).

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



Figure III.17 : Observation de la répartition des granulats pour le BAP T.



Figure III.18 : Observation de la répartition des granulats pour le BAP VF.



Figure III.19 : Observation de la répartition des granulats pour le BAP PZ.

III.4.2. Evolution des résistances mécaniques en compression

La résistance à la compression est une caractéristique essentielle des bétons 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.

Les résultats sont présentés dans les figures III 20 et 21.

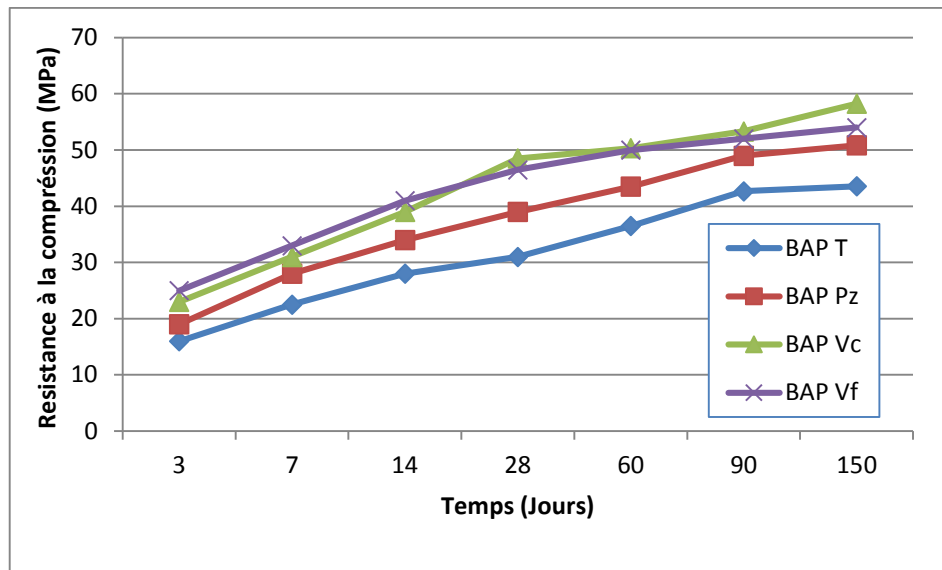


Figure III.20 : Comparaison des résistances mécaniques à la compression des différents BAP.

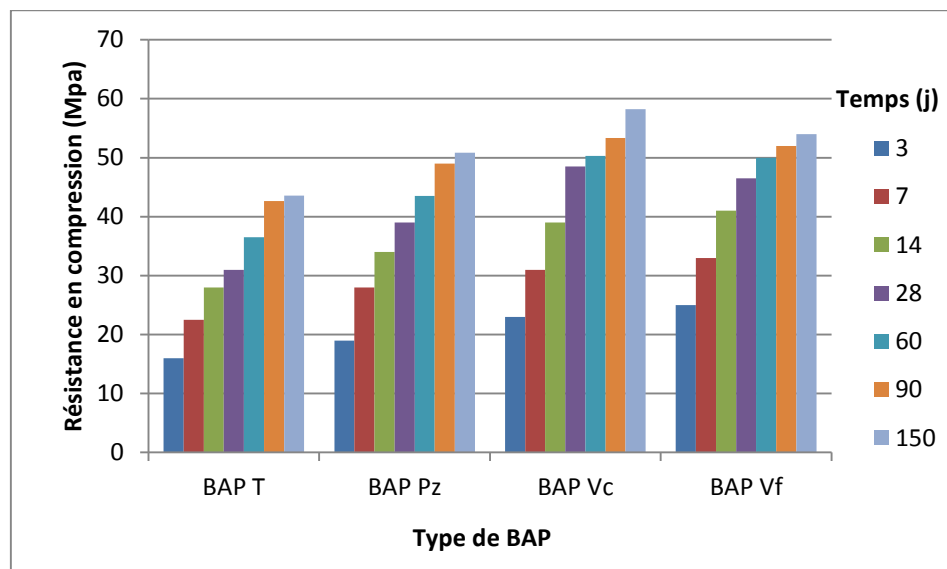


Figure III.21 : Evolution des résistances mécaniques des BAP en fonction du temps.

D'après les résultats obtenus on remarque que les résistances à la compression de tous les BAP testés augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute. En comparant les classes de résistance, le BAP à base de la vase calcinée de Chorfa (BAP VC) présente des résistances mécaniques à la compression plus élevées (48.5 MPa à 28 jours) par rapport aux BAP à base de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (BAP PZ) et le BAP témoin (BAP T). En effet les BAP à base d'ajouts (BAP VC et BAP VF) présentent une supériorité dans le développement des performances mécaniques par rapport au témoin respectivement de l'ordre de 30.43%, 36% à 3 jours et 36%, 33% à 28 jours.

Au-delà de cette échéance (60, 90 et 150 jours), les BAP à base de vase de Chorfa et de Fergoug développent des résistances à la compression supérieures à celles des BAP incorporant la pouzzolane et le BAP témoin. En effet à 150 jours, les BAP à base d'ajouts (BAP VC et BAP VF) développent des gains de résistances par rapport au BAP PZ et témoin respectivement d'environ 12.7%, 5.8% et 25%, 19.35%. Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et qui se développe tardivement.

Par ailleurs le comportement mécanique du BAP contenant la vase de Chorfa est meilleur que celui du BAP à base de vase de Fergoug au-delà de 28 jours de durcissement.

L'incorporation de la vase calcinée génère une accélération de la résistance mécanique des bétons dans lesquels elle est incorporée et ce à toutes les échéances. Les particules de la vase calcinée 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 d'autant plus que la vase présente une finesse plus élevée. Ces effets ont une influence visible sur la résistance mécanique avant et après 28 jours.

III.5 CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif de comparer les résistances mécaniques des mortiers et BAP à base de vase calcinée des barrages Chorfa et Fergoug, de pouzzolane naturelle et des formulations témoins.

La substitution de 20% de ciment par la vase de Chorfa procure une chaleur plus importante que celle procurée par la vase de Fergoug et ou par la pouzzolane naturelle pour le même taux de substitution.

Les résultats obtenus en terme de résistances mécaniques ont permis de montrer que pour un taux de substitution de 20% la vase de barrage du Fergoug améliore plus la résistance des mortiers au jeune âge (3, 7 et 28 jours), par contre la contribution de la vase du barrage de est Chorfa plus marquée à long terme (60, 90 et 180 jours).

En ce qui concerne les BAP, ceux à base de la vase de Chorfa développe des résistances à la compression légèrement supérieures à ceux à base de la vase de Fergoug notamment au-delà de 28 jours.



CHAPITRE 3

***RESULTATS DE L'ETUDE DE
DURABILITE***

CHAPITRE 3 : RESULTATS DE L'ETUDE DE DURABILITE

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 envers des phénomènes affectant la durabilité.

Les résultats présentés dans ce chapitre touchent par conséquent les propriétés chimiques des deux groupes de bétons autoplacants élaborés à savoir le BAP à base de pouzzolane et les BAP incorporant la vase calcinée caractérisant leur résistance aux attaques chimiques des sulfates, des acides et du CO₂.

III.2 LA RESISTANCE AUX 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.

L'attaque du béton par les sulfates résulte d'une réaction chimique qui se produit en présence d'eau entre les sulfates, les aluminates de calcium hydratées et non hydratées, et/ou les éléments constitutifs des hydrates de calcium de la pâte de ciment durcie. Les produits qui résultent de ces réactions sont l'hydrate de trisulfoaluminate de calcium communément appelé ettringite, l'hydrate de sulfate de calcium mieux connu sous le nom de gypse et la thaumasite, qui se formerait préférentiellement lors d'attaques sulfatiques à des températures assez basses (entre 0 et 5°C). Les volumes de ces éléments sont beaucoup plus grands que ceux des corps qui leur ont donné naissance ; il en résulte des contraintes fortes qui peuvent détériorer la pâte et finalement désintégrer le béton. Les conséquences de la pénétration des

sulfates dans le béton peuvent entraîner un gonflement, une perte de résistance et une altération de la surface de l'élément en béton [64].

Dans cette partie d'étude, nous avons testé la résistance chimique des 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 l'évolution des masses 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. Variation de la masse dans la solution témoin

La figure III.22 montre la variation de la masse des éprouvettes des quatre 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.

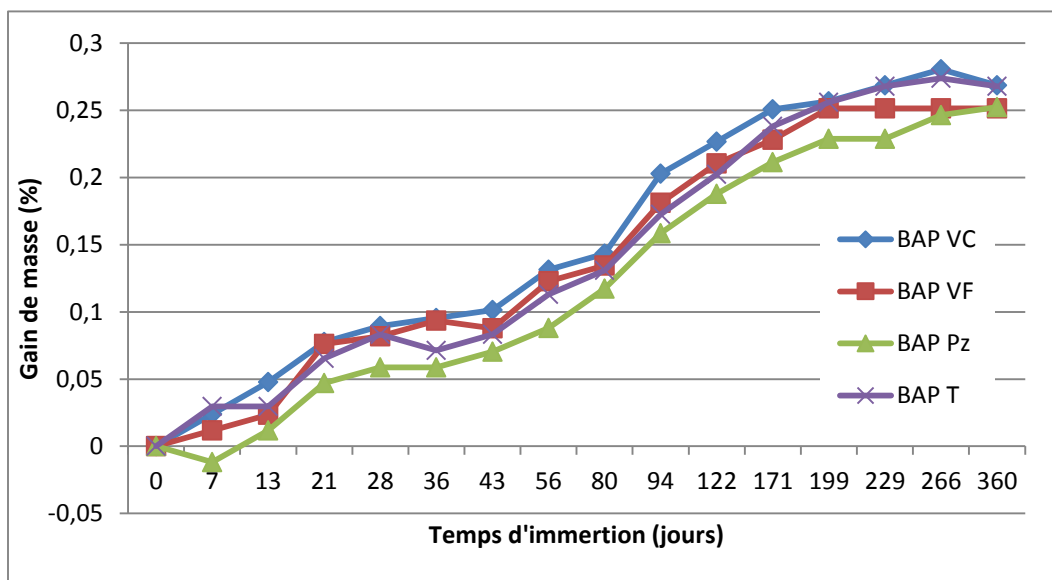


Figure III.22: Variation de la masse des échantillons immergés dans l'eau douce

La figure III.22 montre que les bétons présentent un gain de leurs masses respectives. Ce gain évolue en fonction de la durée d'immersion jusqu'à 360 jours. La comparaison entre les BAP montre que la cinétique du gain en masse est pratiquement la même pour les quatre BAP avec une légère supériorité pour le BAP-VC. Cela est probablement dû à la structure poreuse

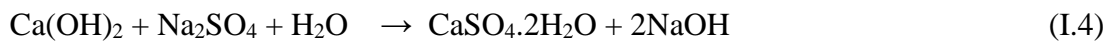
éventuelle des grains de la vase [57], mais les taux de gain de masse restent très acceptables dus probablement aux grandes surfaces spécifiques Blaine des deux poudres (vase et pouzzolane) qui engendrent une grande finesse du réseau poreux et une faible diffusivité des quatre BAP.

L'accroissement progressif du gain de masse est attribué à la continuité de la formation d'hydrates dans les différents 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.

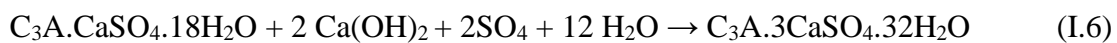
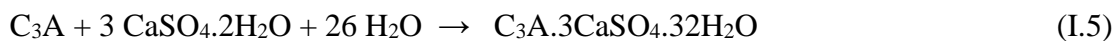
III.2.2 Résultats de l'attaque par le sulfate de sodium Na_2SO_4

Les aluminates de calcium et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates de sodium [64].

En présence de sulfate de sodium l'hydroxyde de calcium réagit pour former le gypse selon la formule I.4 (voir Partie I, chapitre 2).



Le gypse formé par cette réaction, participe à la formation de l'ettringite secondaire à partir du C_3A anhydre résiduel ou les aluminates hydratés (monosulfoaluminates), selon les formules I.5 et I.6 (voir Partie I, chapitre 2).



III.2.2.1 Variation de la masse dans la solution de sulfate Na_2SO_4

Le changement de la masse des échantillons immergés dans la solution 5% Na_2SO_4 est représenté en fonction du temps d'immersion sur la figure III.23. La référence est la dernière mesure avant immersion

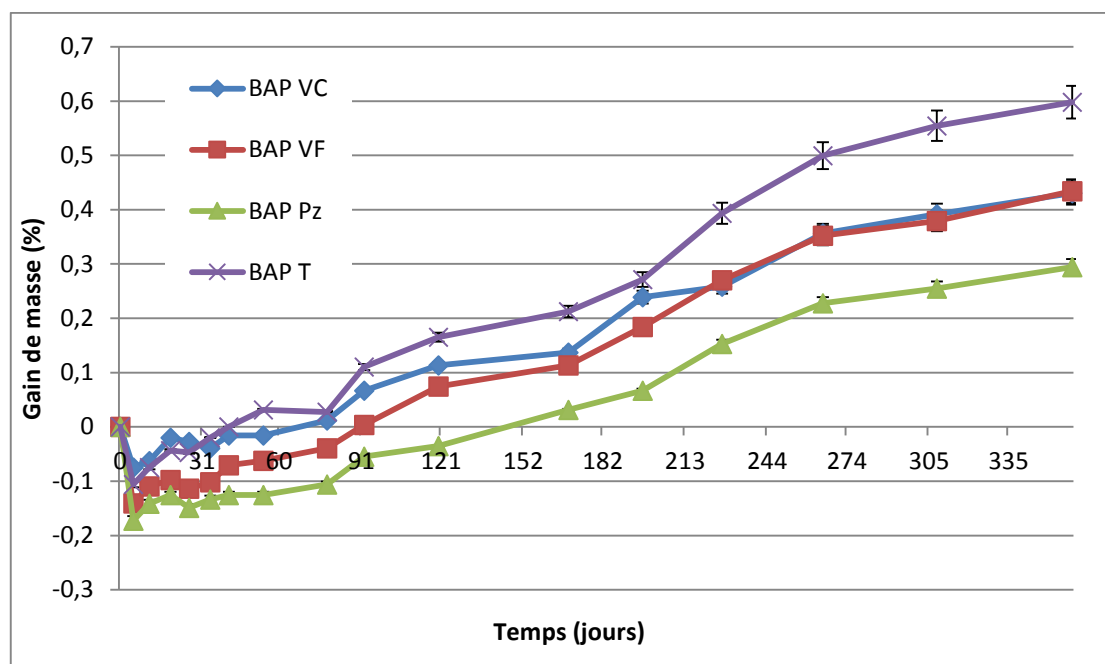


Figure III.23: variation de la masse des échantillons immergés dans la solution du sulfate de sodium

Une perte de masse est observée durant les premiers temps d'immersion pour tous les BAP immergés dans la solution sulfatique, ce changement est attribuable au phénomène diffusif, Cette perte est, ensuite suivie d'une augmentation de masse.

La phase interstitielle contenue dans la matrice a un pH basique d'environ 13. Si cette dernière se trouve au contact d'une eau distillée, très peu chargée en ions, et donc de pH plus faible que celui de la solution interstitielle (environ 7), la pâte de ciment se trouve en déséquilibre avec ce milieu extérieur. Il y a alors une lixiviation progressive des hydrates se traduisant par une décalcification de la pâte, par la dissolution de la portlandite et enfin par une attaque progressive des gels CSH.

A ce stade de l'essai, il n'est pas possible de mettre en évidence une dégradation caractéristique de l'attaque sulfatique externe. Nous remarquons une évolution positive de la variation de la masse de tous les bétons en fonction de la durée d'immersion dans la solution. 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 de la solution. Khelifa et al [127] ajoutent que le gain de masse peut provenir de l'eau qui remplit les fissures, mais aussi d'une masse d'eau utilisée pour précipiter une phase hydratée telle que l'ettringite.

Par comparaison entre les différents BAP, nous pouvons remarquer que les BAP PZ, les BAP VC et BAP VF présentent des gains de masse moins importants que ceux du BAP T.

Les résultats des BAP avec ajouts et BAP T montrent que la comparaison entre ces deux types de béton est en rapport direct avec l'addition minérale utilisée. Le BAP.VC présente un gain de masse presque similaire avec celui du BAP.VF si on prend en compte la dispersion des mesures. Le BAP.T est plus sensible à la dégradation par l'attaque du sulfate de sodium.

III.2.2.2 Suivi de la résistance à la compression

Les résistances à la compression ont été suivies sur des éprouvettes de $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ immergées dans la solution de sulfate de sodium. Les échéances de mesure sont : avant immersion, après 360 jours d'immersion.

La figure III.24 montre l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la durée d'immersion des différents bétons d'étude conservés dans la solution Na_2SO_4 .

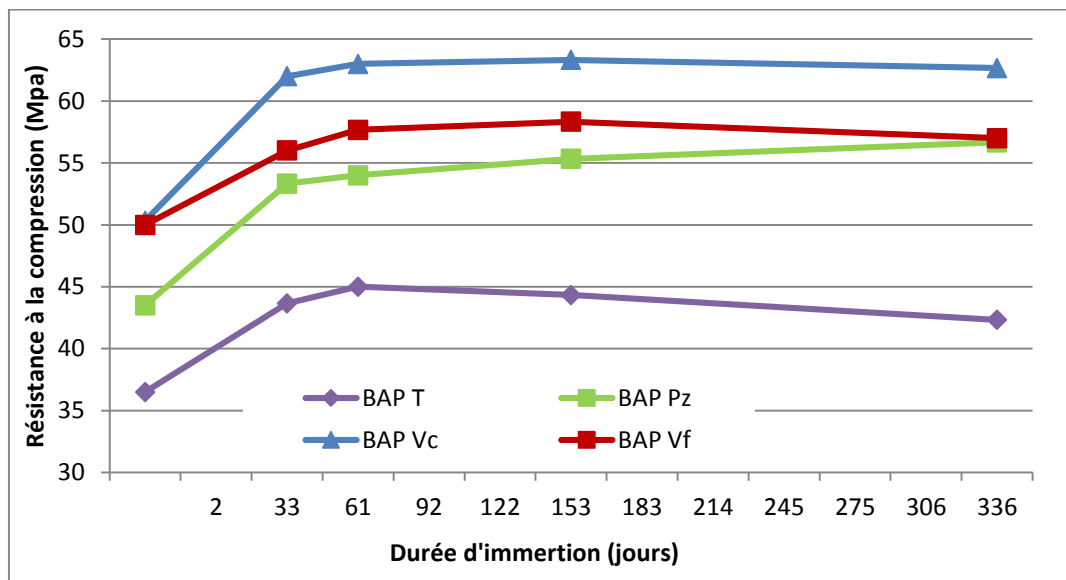


Figure III.24: Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% Na_2SO_4 ,

L'analyse des résultats illustrés sur la Figure III.24, montre que la résistance à la compression de tous les bétons conservés dans la solution sulfatique Na_2SO_4 se développe positivement jusqu'à 60 jours d'âge d'immersion. À partir de cette échéance, la résistance du BAP T tend à diminuer progressivement jusqu'à 360 jours pour atteindre une différence de 5,8 MPa (14%) par rapport à la résistance initiale avant immersion dans la solution sulfatique. Le BAP VC et le BAP VF présentent respectivement une résistance maximale à 180 jours d'âge d'immersion de 63,33 et 58,33 MPa pour diminuer légèrement à 360 jours (62,66 et 57 MPa), mais en

tenant compte de la dispersion des mesures, nous pouvons dire que la résistance est stable pour ce type de béton.

La chute de résistance est attribuée à la formation du gypse et de l'ettringite expansive (équation (III.1), (III.2) et (III.3)) causant des microfissures dans le béton.

Pour le BAP.PZ 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 ce type de BAP.

Les résultats de la résistance à la compression montrent une influence positive de la pouzzolane naturelle 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.

III.2.2.3 Examen visuel

Des photos ont été prises pour évaluer les signes de la détérioration extérieure des éprouvettes de béton tels que l'altération, la fissuration et le ramollissement suite à leur conservation dans le milieu sulfatique.

La figure III.25 montre l'état des cubes $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ des différents bétons après 360 jours d'immersion dans la solution 5% Na_2SO_4 .

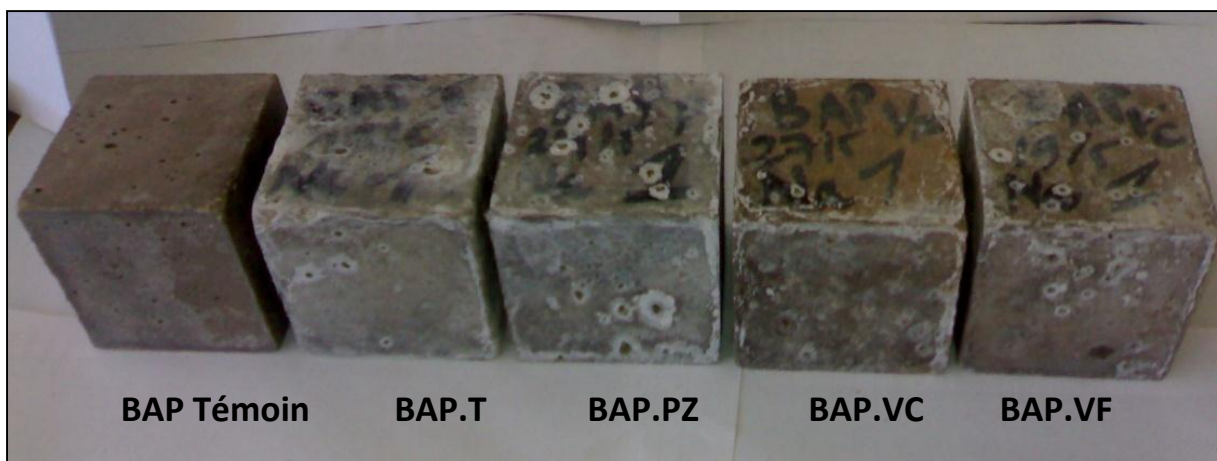


Figure III.25: Echantillons des différents bétons, après 360 jours d'immersion dans la solution de 5% de Na_2SO_4



Figure III.26: Echantillons de BAP T, après 360 jours d'immersion dans la solution de 5% de Na_2SO_4

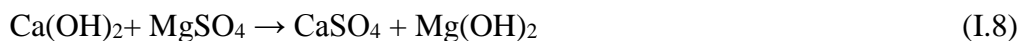
La photo de la Figure III.25 ne révèle pas de signe significatif de dégradation des différents échantillons. Cela est en accord avec l'absence de la perte en masse enregistrée après 360 jours de conservation dans la solution de 5% de Na_2SO_4 .

L'examen visuel du BAP.T (Figure III.26) montre seulement des fissures autour des coins et des bords des éprouvettes, ce qui explique la diminution rapide de la masse de ce béton entre 270 et 360 jours d'âge d'immersion dans la solution sulfatique.

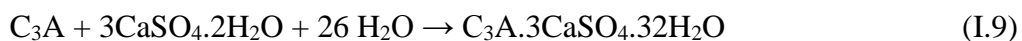
III.2.3 Résultats de l'attaque par le sulfate de Magnesium MgSO_4

Le MgSO_4 engendre une double action : la formation d'ettringite et la substitution des ions Ca^{2+} en Mg^{2+} qui le rendent très agressif par rapport au sulfate de sodium,

- **Formation de produits expansifs** (formules I.8 et I.9) (voir Partie I, Chapitre 2).

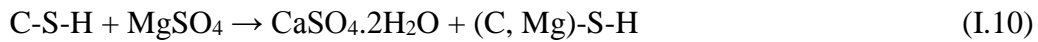


Mg(OH)_2 : c'est la brucite et elle est caractérisée par une faible solubilité et un faible pH.



(Ettringite, expansion)

- **Substitution des ions Ca^{2+} par les ions Mg^{2+} dans les CSH** (formule 1.10) (voir Partie I, Chapitre 2).



(Le gel MSH est faiblement cohésif)

Le silicate de magnésium hydraté (C, 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.2.3.1 Variation de la masse dans la solution de sulfate MgSO_4

Le changement de la masse des échantillons immergés dans la solution 5% MgSO_4 est représenté en fonction du temps d'immersion sur la figure III.27. La référence est la dernière mesure avant immersion

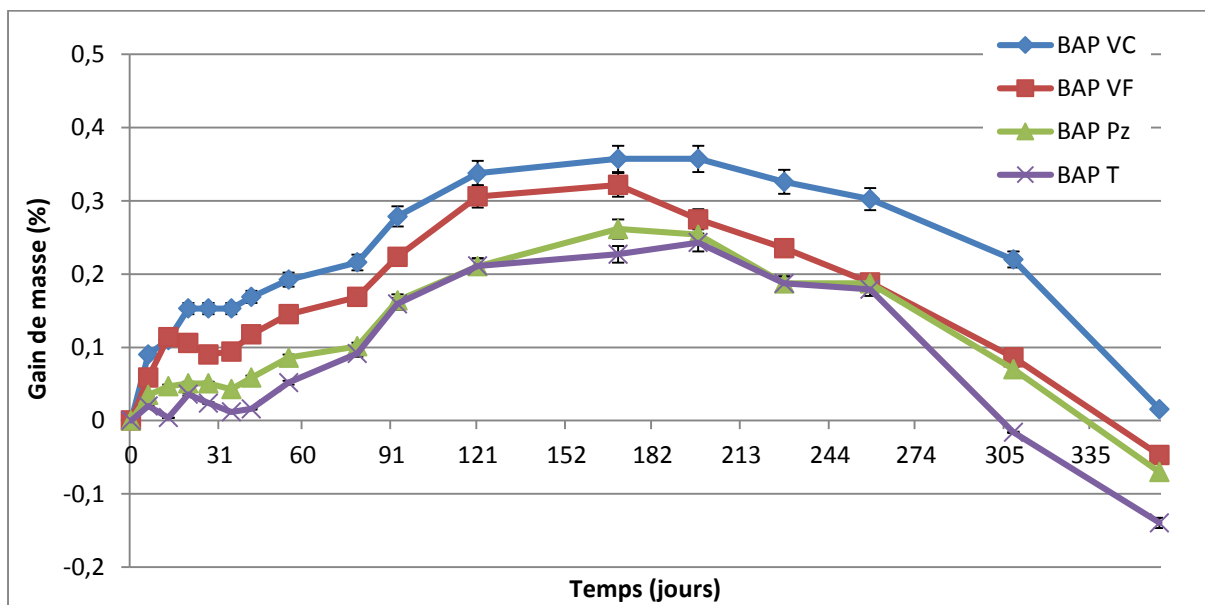


Figure III.27: variation de la masse des échantillons immergés dans la solution de 5% MgSO_4 .

Les éprouvettes immergées dans la solution sulfatique MgSO_4 avec une concentration à 5%, se distinguent par une augmentation de la masse dès les premiers jours de l'immersion et il y a une continuité d'augmentation jusqu'à 200 jours avec un gain de masse de 0,37% pour le BAP.VC. Ce phénomène est justifié par la formation des produits volumineux, l'attaque du BAP par les sulfates de magnésium engendre une réaction chimique qui se produit en présence d'eau entre les ions de sulfate et l'aluminat de calcium hydraté C_3A et les éléments constitutifs de l'hydrate de calcium de la pâte de ciment durci.

Le BAP.VC présente un gain de masse moins important au delà de 200 jours que celui des BAP.VF, BAP.PZ et BAP.T. Le gain de masse du BAP.VF est presque similaire que celui du BAP.PZ si on prend en compte la dispersion des mesures. Le BAP.T est plus sensible à la dégradation par l'attaque du sulfate de magnésium à long terme.

La variation de la masse des bétons peut être expliquée par les processus de transport, perméabilité et diffusion, au sein de la matrice cimentaire. Ces propriétés de transport sont considérées comme « des indicateurs de durabilité ». Ils dépendent fortement du réseau poreux, de sa connectivité et de la teneur en solution interstitielle du matériau.

L'augmentation de la masse dans le cas de l'attaque du $MgSO_4$ par rapport à l'attaque du Na_2SO_4 , peut être expliquée par la formation de la brucite (formule III.4), qui est un produit très peu soluble avec un pH faible [83].

Les produits qui résultent de cette réaction sont l'ettringite et le gypse. La formation d'ettringite est liée à l'augmentation de 8 fois le volume initial [76] jusqu'à ce que les cristaux en aiguilles n'aient plus d'espace pour croître dans les pores.

III.2.3.2 Suivi de la résistance à la compression

Les résistances à la compression ont été suivies sur des éprouvettes de $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ immergées dans la solution de sulfate de magnésium. Les échéances de mesure sont : avant immersion, après 90 jours d'immersion.

La figure III.28 montre l'effet de la substitution partielle du ciment CEMI par de la vase calcinée et la pouzzolane naturelle sur l'évolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans une solution de 5 % sulfate de magnésium.

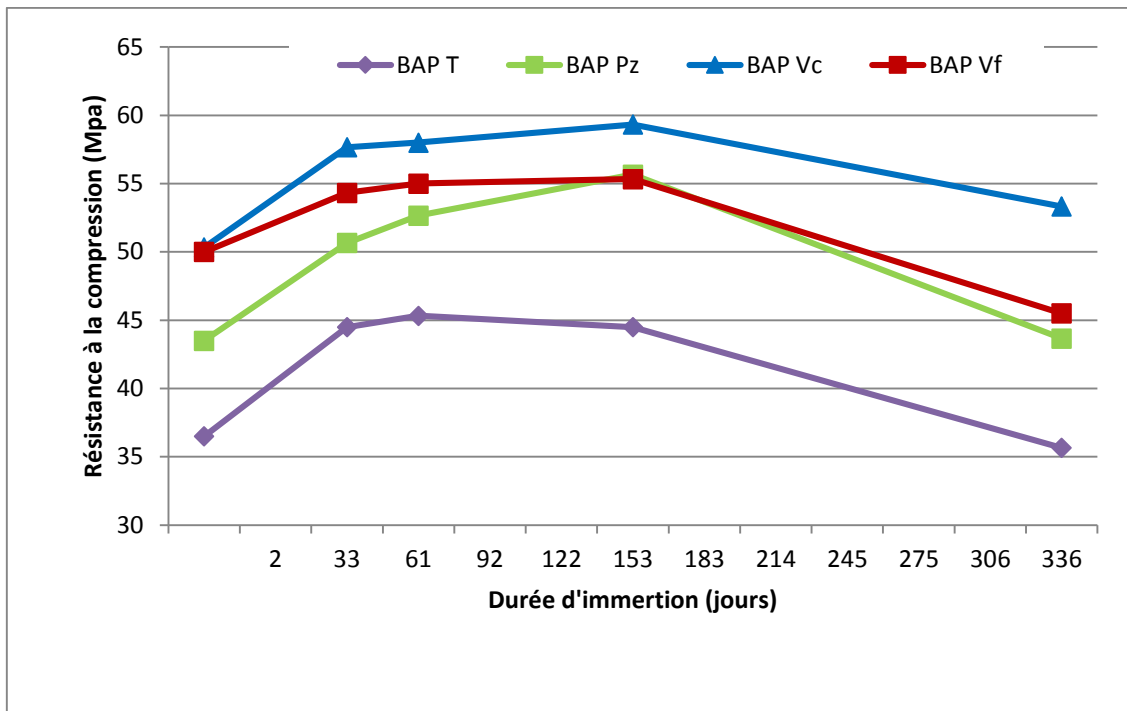


Figure III.28: Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% $MgSO_4$,

A l'instar des résultats de l'immersion dans la solution de 5 % de sulfate de magnésium, on constate que la résistance à la compression du BAP.T a chuté dès le 60^{ème} jour de conservation en solution. La diminution de la résistance est de l'ordre de 9,6 MPa. En revanche les autres bétons sont affectés à partir du 180^{ème} jour d'immersion.

Le BAP VC, BAP VF et le BAP PZ présentent respectivement une résistance maximale à 180 jours d'âge d'immersion (59,33, 55,66 et 55,33 MPa) pour diminuer considérablement à 360 jours (53,33, 45,5 et 43,66 MPa), mais en tenant compte de la dispersion des mesures, nous pouvons dire que la résistance est moins stable pour ces types de béton.

Plusieurs recherches indiquent que l'augmentation de la résistance à la compression avant sa chute à un certain âge est due à la formation de l'ettringite et du gypse qui remplissent les micropores menant à une structure dense, 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 bétons [128] [129]. L'agression chimique due aux solutions de sulfate de sodium et de sulfate de magnésium, après leur pénétration dans la matrice cimentaire, se caractérise par leur réaction avec les hydrates et le changement de leur structure.

On peut remarquer aussi que le BAP.VC présente des résistances meilleures par rapport aux autres BAP à 360 jours d'immersion dans la solution $MgSO_4$.

III.2.3.3 Examen visuel

De même que l'examen visuel effectué sur les BAP immergés dans la solution Na_2SO_4 , des photos ont été prises pour évaluer les signes de détérioration extérieure des éprouvettes de béton après 360 jours d'immersion dans la solution 5% $MgSO_4$ (Figures III.29 et III.30).



Figure III.29: Echantillons de différents bétons, après 360 jours d'immersion dans la solution de 5% de $MgSO_4$



Figure III.30: Echantillons de BAP T, après 360 jours d'immersion dans la solution de 5% de $MgSO_4$

La Figure III.29 ne révèle pas de signe significatif de dégradation des différents échantillons.

Par ailleurs l'examen visuel du BAP.T montre des fissures autour des coins et des bords des éprouvettes et la formation d'une couche blanchâtre sur la surface extérieure des échantillons et qui caractérise le déclenchement de la formation du gypse (figure III.30). Ceci explique la diminution rapide de la masse de ce béton entre 60 et 360 jours d'âge d'immersion dans la solution sulfatique.

III.3 LA RESISTANCE AUX ATTAQUES ACIDES (HCl ET H₂SO₄)

L'essai de la résistance aux attaques acides, consiste à suivre l'évolution de la masse d'échantillons immergés dans une solution saturée en acide (5% en volume).

Des essais d'immersion dans des solutions d'acide sulfurique (H₂SO₄) et d'acide chlorhydrique (HCl) ont été effectués pour évaluer la résistance des différentes formulations de BAP.

Les échantillons testés sont de formes cylindriques de 6.3 cm de diamètre et de 12.6 cm de hauteur. Deux échantillons sont utilisés par formulation. L'essai a été réalisé après 90 jours de conservation dans l'eau.

A l'échéance souhaitée, les cylindriques ont été sortis de l'eau et laissés dans une ambiance de 23°C et de 50% hygrométrie relative pendant 30 minutes afin d'éliminer l'excès d'eau sur la surface des éprouvettes.

La masse sèche initiale (M_0) des cubes est déterminée avant leurs immersions dans des solutions acides [119].

Des solutions d'acides sulfuriques et d'acides chlorhydriques avec des concentrations initiales de 5% en volume ont été préparées dans des récipients résistants à l'acide. Ces solutions ont été placées à une température ambiante de 23°C. Les échantillons sont alors disposés et espacés de 2 cm et recouvert d'environ 2 cm de solution acide [130].

Un pH mètre a été utilisé pour surveiller les niveaux du pH tout les deux jours. Le pH maximum mesuré est de 2,0 pour le (H₂SO₄) et de 5,0 pour le (HCl).

III.3.1. Résultats de l'attaque par l'acide H₂SO₄

III.3.1.1 Variation de masse

Selon la procédure de la norme ASTM C 267 [120] : les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce pour éliminer le béton altéré, puis on les laisse à l'air libre pendant 30 mn pour procéder ensuite à la pesée. Cette opération est effectuée après chaque semaine d'immersion et pendant 10 semaines.

La variation de la masse de chaque éprouvette est calculée à partir de l'équation suivante (Equation II.5) (voir Partie II, Chapitre 2). :

$$VM \% = \left[\frac{M_0 - M_i}{M_0} \right] \times 100 \quad (II.5)$$

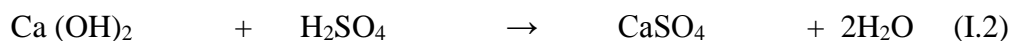
Avec

VM : variation de la masse en (%) ;

M₀ : la masse de l'éprouvette avant exposition à l'attaque acide en (gramme) ;

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

Un cas très agressif et destructif d'attaque par acide se produit lorsque le béton est exposé à l'acide sulfurique (H₂SO₄). Le sel de calcium produit par la réaction de l'acide sulfurique et de l'hydroxyde de calcium est un sulfate de calcium qui cause une dégradation accrue. Ce processus est illustré par la formule I.2. (voir Partie I, Chapitre 2).



Hydroxyde de calcium acide sulfurique sulfate de calcium eau

Le suivi de la perte en poids en fonction du temps des éprouvettes des BAP immergées dans la solution à base d'acide sulfurique H₂SO₄ est illustré par la figure III.31.

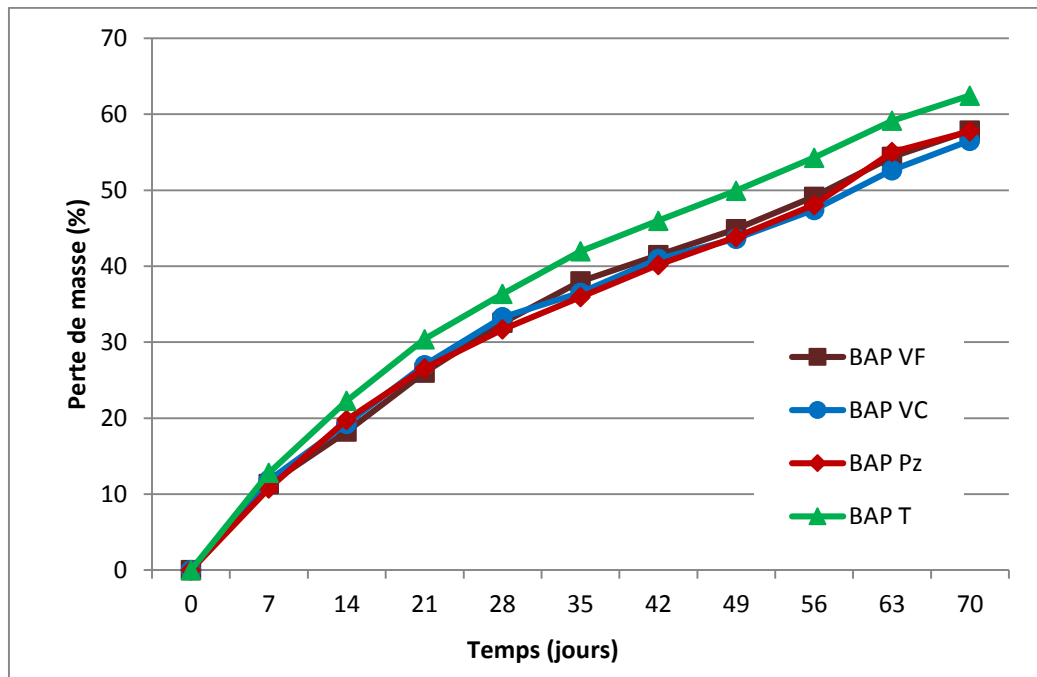


Figure III.31. Perte de masse des bétons âgés de 90j et immergés dans la solution H_2SO_4

On constate que le BAP T immergé dans la solution d'acide sulfurique subi une légère dégradation par rapport aux autres bétons, il perd 62% de son poids après 70 jours d'immersion.

Le BAP PZ, PAP VF et Le BAP VC ont subi presque la même perte de masse. Une perte moyenne d'environ de 57 % a été enregistrée pour ces derniers à 70 jours.

Il est à noter que les BAP à base de vase de Chorfa et de Fergoug résistent mieux à l'attaque de l'acide sulfurique par rapport aux autres bétons. En effet ils perdent 56 % de leur poids à 70 jours d'immersion.

L'apport des ajouts minéraux, sans tenir compte de leur contribution du point de vue économique et écologique, se manifeste par :

- la fixation de l'hydroxyde de calcium par l'ajout actif,
- la diminution de la porosité de la pâte de ciment durci, ce qui freine la pénétration des agents agressifs.

On remarque que l'incorporation des additions minérales augmente la résistance chimique des BAP dans les milieux agressifs (acide), comme il a été mis en évidence par plusieurs recherches [131].

La perte de masse est due au fait que le Ciment Portland Artificiel, après hydratation, libère une partie considérable d'hydroxyde de calcium libre (CH) qui peut être lixiviée à l'extérieur quand elle est soumise à l'acide.

Pour le béton en contact avec l'acide sulfurique (H_2SO_4), l'hydroxyde de calcium réagit avec l'acide sulfurique pour former le sulfate de calcium, qui est déposé comme gypse.

Pendant que l'attaque se poursuit, tous les composants du ciment sont par la suite décomposés et lixiviés. En outre le sulfate de calcium constitué par la première réaction va réagir avec la phase d'aluminate de calcium dans le ciment pour former le sulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite), qui, après cristallisation, peut causer l'expansion du béton. La couche de gypse précipitée est facilement lixiviée conduisant à une perte de masse considérable.

Dans les ciments avec ajouts, la quantité de CH étant moins importante que dans le ciment sans ajout, cela est dû à la réaction pouzzolanique qui fixe la chaux. Par conséquent, les pores capillaires sont réduits par formation des gels CSH, bloquant ainsi l'absorption de la solution acide, d'où une réduction de la perte de masse.

III.3.1.2. Examen visuel

La Figure III.32 montre l'état des échantillons de tous les bétons d'étude, après 5 semaines d'immersion dans la solution du 5% H_2SO_4



Figure III.32 : Dégradation des échantillons du béton après 6 semaines d'immersion dans la solution d'acide sulfurique.

Avant le nettoyage des échantillons retirés de la solution d'acide sulfurique, nous avons pu remarquer une couche blanchâtre facilement lavable par l'eau utilisée pour ce nettoyage. Les photos présentées dans la Figure III.32 ont été prises après lavage de la couche blanchâtre.

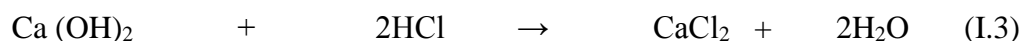
A partir de cette figure, nous pouvons constater la dégradation des échantillons de tous les bétons d'essai, surtout pour le BAP T. Ces bétons ont subi une variation dimensionnelle considérable (ce dernier a perdu plus de 1 cm de chaque côté).

L'altération des échantillons est présentée par un déchaussement des granulats dans toutes les surfaces exposées à l'acide sulfurique. En effet, nous remarquons la différence entre l'état de dégradation de chaque type de béton. Le BAP PZ, BAP VF et Le BAP VC ont conservé, plus au moins, la pâte de ciment sur les surfaces extérieures, tandis que pour le BAP T, la pâte à l'extérieur de l'échantillon a été complètement frictionnée.

III.3.2. Résultats de l'attaque par l'acide chlorhydrique HCl

III.3.2.1 Variation de masse

L'agressivité de l'attaque d'acide chlorhydrique est provoquée par leur réaction avec une partie d'hydroxyde de calcium de la pâte de ciment, qui produit un sous-produit de sel de calcium fortement soluble et facilement enlevé de la pâte affaiblissant de ce fait la structure de l'ensemble du béton. La réaction de base est illustrée par la formule I.3 (voir Partie I chapitre 2).



Hydroxyde de calcium acide chlorhydrique chlorure de calcium eau

L'effet de l'attaque HCl sur les différents bétons d'étude est quantifié en déterminant les pertes en masse des échantillons en contact avec cet acide.

Le suivi de la perte en poids en fonction du temps des éprouvettes des BAP immergées dans la solution à base d'acide chlorhydrique HCl à 5 % de concentration est illustré par la figure III.33.

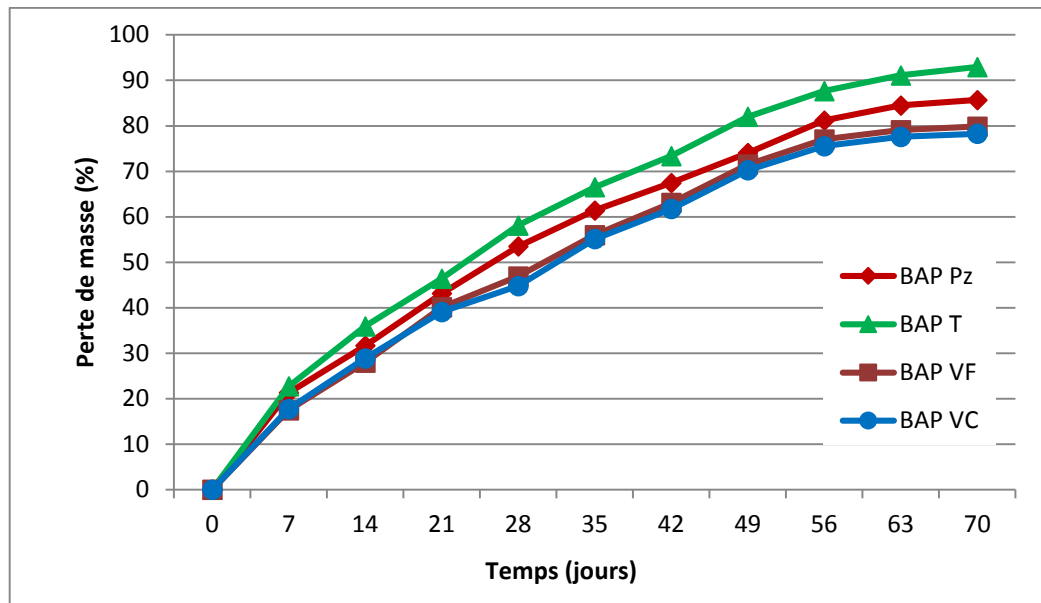


Figure III.33. Variation de la perte en poids des BAP en fonction de la période d'immersion en 5% HCl.

En analysant l'évolution des courbes de la perte en poids des bétons, nous pouvons constater une perte en masse permanente à partir de la première jusqu'à la dixième semaine de tous les bétons immergés dans la solution à base d'acide chlorhydrique à 5% de concentration.

On remarque que le BAP T subit une légère dégradation par rapport aux autres BAP, il perd 92% de son poids après 70 jours d'immersion. Le BAP PZ a subit presque la même perte de masse, on a enregistré une perte de 86% pour ce dernier à 70 jours.

On constate aussi que le BAP VF et BAP VC résistent mieux à l'attaque de l'acide chlorhydrique par rapport aux autres bétons en effet ils perdent respectivement 79 et 78 % de leurs poids à 70 jours.

III.3.2.2. L'examen visuel

L'examen visuel des échantillons en contact avec l'acide chlorhydrique est un moyen pour évaluer la détérioration des propriétés physiques et les dégradations de l'aspect extérieur des éprouvettes.

La Figure III.34 montre l'état des échantillons avant attaque et après 4 semaines d'immersion dans la solution à 5% HCl



Figure III.34 : Dégradation des échantillons du béton après 4 semaines d'exposition aux solutions d'acide chlorhydrique.

Visuellement, nous distinguons clairement l'état des différents échantillons après 4 semaines d'immersion dans la solution d'acide HCl. Ainsi, le BAP T et le BAP PZ ont perdu totalement leur forme cylindrique (absence de plus de la moitié d'échantillon pour le BAP T), tandis que le BAP VC ET BAP VF, ont subi une plus faible dégradation par rapport aux autres bétons, principalement sur les côtés et sur la surface extérieure, où l'acide a décapé la pâte de ciment.

La bonne résistance du BAP à base de vase (pouzzolane artificielle) vis-à-vis de l'attaque acide HCl est très comparable (voire légèrement meilleure) que celle du BAP PZ. L'incorporation de la pouzzolane artificielle ou de la pouzzolane naturelle dans la pâte des BAP augmente la résistance chimique de ces bétons vis-à-vis des agressions à l'acide HCl. Plusieurs recherches ont déjà mis en évidence l'effet bénéfique des additions à caractère pouzzolanique sur la résistivité chimique des mortiers et des bétons [68] [132]. Selon Ghrici et al. [132], l'incorporation de la pouzzolane naturelle réduit les pores capillaires par le remplissage de ces pores par du gel de CSH de seconde génération formé à partir de la pouzzolane et la portlandite. Ce dernier hydrate est très sensible à l'acide puisqu'il est le premier hydrate à se dissoudre lors de la lixiviation.

Hormis la réaction pouzzolanique qui a fait la différence pour les BAP à base de vases et le BAP PZ, nous pouvons lier la meilleure résistance chimique à la résistance à la compression. En général, nous remarquons une diminution de la perte en masse avec l'augmentation de la résistance à la compression et ceci pour tous les bétons d'études.

III.4 CARBONATATIONS ACCELEREE ET NATURELLE

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, tels que la portlandite, pour former des carbonates de calcium. Il en résulte une diminution du pH et une corrosion des armatures.

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. Elle est incolore sur les zones carbonatées et rose sur les zones saines, elle vire pour un pH d'environ 9.

Toutes les formulations étudiées ont été soumises à un essai de carbonatation accélérée. Trois autres échantillons issus de chacune des 4 formulations ont été conservés à l'air libre du laboratoire pour subir la carbonatation naturelle.

III.4.1. Carbonatation accélérée

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).

La variation des profondeurs de carbonatation et la masse des échantillons carbonatés ont été suivis en fonction du temps de conservation.

Nous avons noté la difficulté de mesurer les profondeurs de carbonatation des échantillons de BAP. Le pied à coulisse a été utilisé pour une meilleure précision.

Comme le montre la Figure III.35, qui présente une photo prise après 56 jours de carbonatation, la zone carbonatée des échantillons prend la coloration du béton, alors que la zone saine prend une coloration rose. Le front qui sépare les deux zones est très net, ce qui montre sa régularité pour toutes les formulations étudiées.

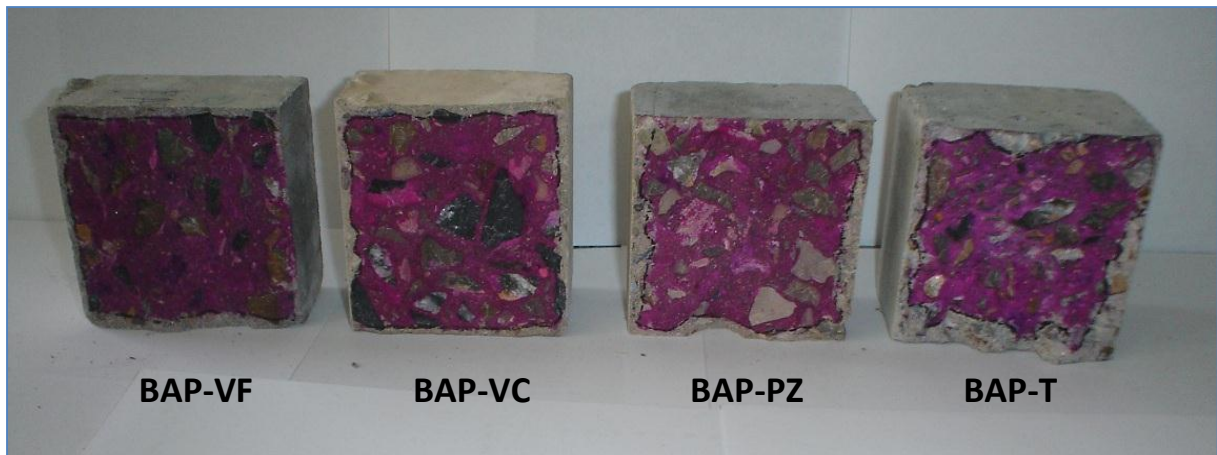


Figure III.352 : Fronts de carbonatation visualisés par pulvérisation à la phénolphtaléine.

L'évolution des profondeurs de carbonatation en fonction du temps d'exposition est représentée sur la figure III.36.

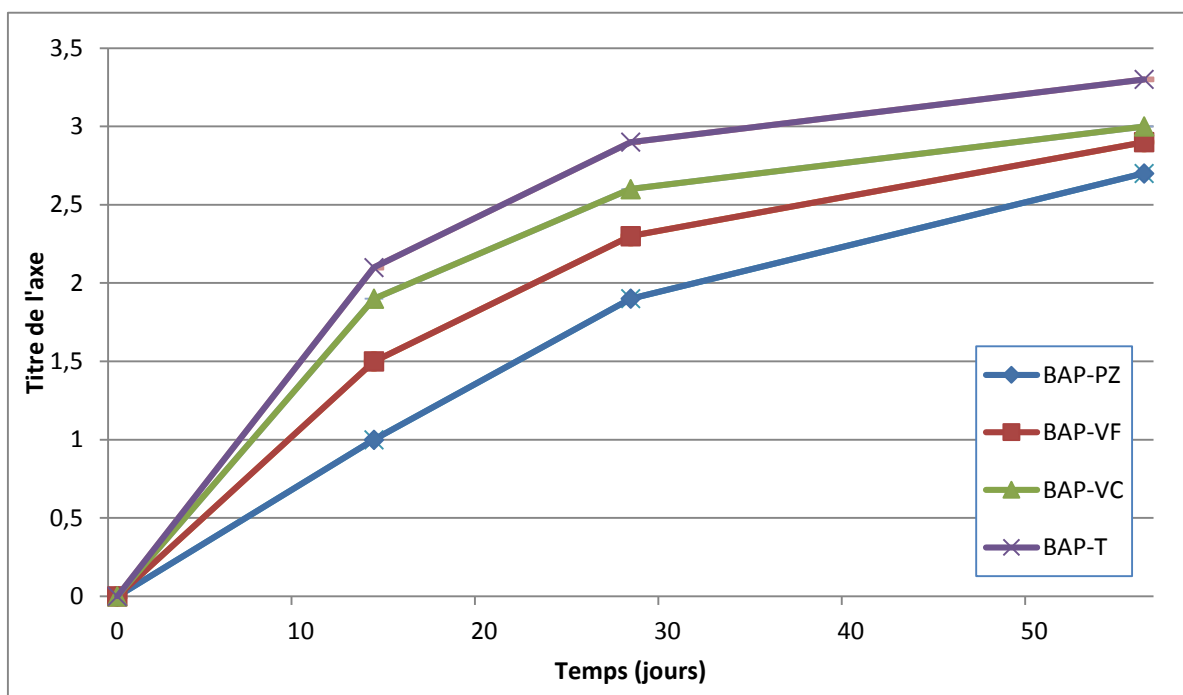


Figure III.36: Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée des bétons

A partir des courbes de la figure III.36 on constate que les valeurs des profondeurs carbonatées pour les BAP sont comprises entre 1,9 et 2,9 mm à 28 jours ce qui est signe de bonne résistivité de ces BAP vis-à-vis de la carbonatation.

On note que les 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/m^3) tendent aussi à freiner la vitesse de pénétration du gaz carbonique puisque ils réduisent le rapport E/C [80].

La courbe montre plus nettement l'effet positif de la vase calcinée et de la pouzzolane naturelle sur la résistivité des BAP envers la carbonatation accélérée. La profondeur de carbonatation du BAP-T est sensiblement supérieure à celle du BAP-VC, BAP-VF et du BAP-PZ (différence de 0.3, 0.4 et 0.6 mm à 56 jours).

III.4.2 Carbonatation naturelle

Trois échantillons de $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ de chacune des formulations des BAP ont été conservés à l'air libre du laboratoire. La mesure de la profondeur carbonatée a été faite après 15 mois d'exposition. Les zones carbonatées sont mises en évidence à la phénolphtaléine : les photos des sections des éprouvettes sont présentées sur la figure III.37.

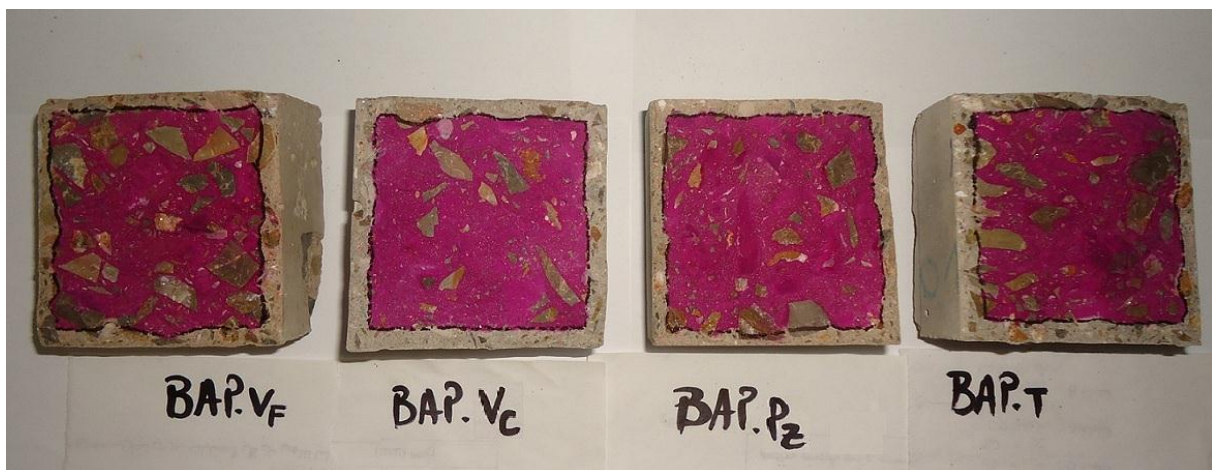


Figure III.37: Carbonatation naturelle à 15 mois.

Les profondeurs carbonatées après 15 mois d'essai sont représentés sur la figure III.38.

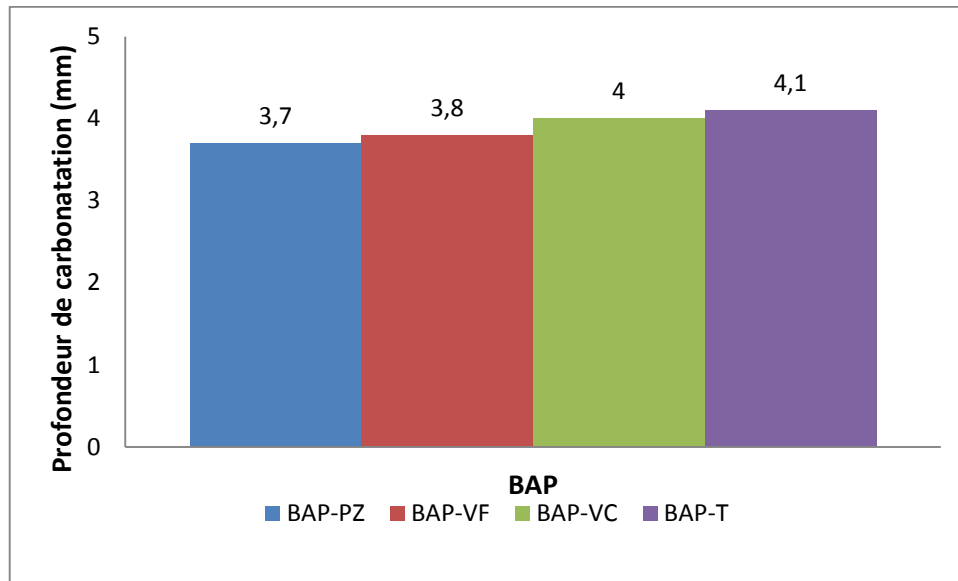


Figure III.38: Profondeur de carbonatation naturelle des bétons d'études, après 15 mois à l'air libre de laboratoire

Les résultats obtenus (Figure III.38) semblent suivre la même tendance que ceux de la carbonatation accélérée.

La comparaison des résultats de la carbonatation naturelle et accélérée indique une cohérence globale des deux essais et montre que le BAP-T présente des profondeurs de carbonatation légèrement supérieures par rapport aux BAP à base de vase calcinée.

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 ([133], [134], [135]), 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 celles de Siad [80], 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 [64], 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 des BAP-V et BAP-PZ et qui est sensiblement plus faible que celle du BAP T. En effet, les pourcentages du CaO dans la pouzzolane naturelle de Béni-Saf est proche de 9%, et proche de 18% et 23% pour la vase calcinée de Fergoug et de Chorfa respectivement. Ces pourcentages ajoutés à la chaux du ciment CPA CEMI 42.5 qui est de l'ordre de (64%), pourrait ralentir la carbonatation en général dans les BAP et faire la différence entre BAP-VC, BAP-VF et BAP-PZ.

III.5. CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre a été de comparer l'effet de l'incorporation de la vase calcinée des barrages de Chorfa et de Fergoug par rapport à celui de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, sur la résistance des bétons vis-à-vis des attaques acides (HCl et H₂SO₄), sulfates (Na₂SO₄ et MgSO₄) et de la carbonatation accélérée et naturelle. Les principales conclusions que nous pouvons tirer, sont les suivantes :

- ◆ l'incorporation de la vase calcinée dans les BAP améliore la résistivité de ces bétons envers l'attaque de l'acide sulfurique. Le BAP VC et le BAP VF présente des performances très comparables à celles du BAP PZ et bien meilleures de celles du BAP T.
- ◆ L'examen visuel a permis de mettre en évidence l'état de chaque béton avant et après attaque H₂SO₄ et HCl. Les photos ont montré le faible taux de perte en forme des échantillons de BAP VC, BAP VF et de BAP PZ, par contre elles ont montré, la disparition de la moitié (voire plus) des échantillons de BAP T.
- ◆ le BAP-VC présente les meilleures résistances au sulfate de magnésium par rapport aux autres BAP à 360 jours d'immersion dans la solution MgSO₄.
- ◆ Les photos prises pour les bétons immergés dans la solution Na₂SO₄ n'ont pas permis d'enregistrer des signes extérieurs de dégradation des différents échantillons étudiés. Tandis que nous avons pu identifier des fissures autour des coins et des bords des éprouvettes de BAP-T.
- ◆ La présence 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.
- ◆ Malgré la faible différence, nous pouvons conclure qu'en général, le BAP PZ, le BAP VC et le BAP VF résistent mieux à la carbonatation. Cette différence peut être liée au pourcentage du CaO présent dans la pouzzolane naturelle et la vase calcinée.

Le BAP-T présente des épaisseurs des fronts de carbonatation légèrement supérieures à celles des BAP avec ajouts.



**CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES**

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les travaux de notre étude ont été menés dans le but d'atteindre deux principaux objectifs. Le premier objectif concerne la mise en évidence de la valorisation de la vase issue des barrages de Chorfa et de Fergoug, qui est un matériau nécessitant peu d'énergie pour son exploitation, comme substitut minéral partiel au ciment dans la composition des BAP. 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 au béton témoin et aux propriétés offertes par la pouzzolane naturelle de la région de Béni-saf sur le même type de béton.

Pour se faire, nous avons commencé par la caractérisation des différents matériaux utilisés dans les compositions des mortiers et bétons d'études. Nous avons adopté une formulation qui couvre quatre types de BAP de même classe de résistance: un BAP à base de pouzzolane naturelle (BAP-PZ), un BAP à base de vase calcinée du barrage de Chorfa (BAP-VC), un BAP à base de vase calcinée du barrage de Fergoug (BAP-VF) et enfin un BAP témoin sans ajout (BAP-T), 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/C identique.

Les principales conclusions auxquelles nous sommes parvenues sont :

- La présence de la vase contribue à une certaine diminution du temps de début et fin de prise Néanmoins, ce phénomène s'inverse en présence d'adjuvant notamment pour les forts dosages en superplastifiant. Ces derniers, ont tendance à jouer le rôle de retardateur de prise en présence de vase.
- L'évolution de la température d'hydratation des mortiers montre que la température maximale d'hydratation des mortiers avec ajout diminue par rapport au mortier témoin. Il en résulte que le risque de fissuration est moindre. Cela peut être dû au caractère lent de la réaction pouzzolanique, comparé à la réaction d'hydratation du C₃S.
- Pour des taux de substitution de 20% la vase du barrage de Fergoug améliorerait la résistance des mortiers au jeune âge (3, 7 et 28 jours), par contre celle du Chorfa contribuerait à une amélioration à long terme (60, 90 et 180 jours).
- L'introduction de la vase dans les mortiers et les BAP a conduit à l'augmentation du dosage en superplastifiant.

- A l'état frais toutes nos formulations de BAP ont été qualifiées d'autoplaçantes selon les spécificités de l'AFGC.
- Le BAP à base de vase de Chorfa développe des résistances à la compression légèrement supérieures à celles du BAP à base de vase de Fergoug notamment à long terme.

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

- Ces résultats montrent que la vase calcinée des barrages de Chorfa et de Fergoug influent très positivement sur les propriétés des bétons autoplaçants (BAP) vis-à-vis de la durabilité ainsi que sur leur résistance dans les milieux contenant des acides, sulfates et du CO₂. Ils montrent également, d'une façon générale, des comportements très proches entre la vase et la pouzzolane naturelle.
- L'immersion des échantillons de BAP et de BOV dans la solution de sulfate de sodium, nous a permis de tirer quelques conclusions, bien que la durée d'immersion (360 jours pour le suivi de la masse et de la résistance à la compression,) n'a pas mis en évidence une dégradation caractéristique de l'attaque sulfatique. En effet, la comparaison entre les différentes formulations de BAP a montré que, la résistance du BAP.PZ continue d'augmenter jusqu'à 360 jours d'immersion. La conservation dans la solution sulfatique ne semble pas beaucoup influencer la résistance de ce type de BAP. Cependant, quelques échantillons de BAP.VC et BAP.VF ont montré une faible perte de la résistance à la compression par rapport au BAP.PZ.
- Le BAP-VC présente des résistances meilleures au sulfate de magnésium par rapport aux autres BAP à 360 jours d'immersion dans la solution MgSO₄.
- L'incorporation de la vase calcinée dans les BAP améliore la résistivité de ces bétons vis-à-vis de l'attaque de l'acide sulfurique (H₂SO₄) et chlorhydrique (HCl). Le BAP VC et le BAP VF présente des performances très comparables à celles du BAP PZ et bien meilleures que celles du BAP T.
- Malgré la faible différence, nous pouvons conclure qu'en général, le BAP PZ résiste mieux à la carbonatation que le BAP VC et le BAP VF. Cette différence peut être liée au pourcentage du CaO présent dans la pouzzolane naturelle et la vase calcinée.

Enfin, à travers tous les résultats présentés dans ce travail, nous pouvons conclure que la vase provenant de Chorfa et Fergoug peut être utilisée avec succès, comme addition minérale dans les formulations des BAP. L'incorporation de ce matériau naturel dans les BAP conduit en général à des performances très comparables, voire meilleures (comme pour les acides et les sulfates) à celles des bétons incorporant la pouzzolane naturelle de l'ouest algérien.

La possibilité de valoriser la vase (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 une étude sur des BAP à base de vase relative aux paramètres physico-mécaniques tels que les modules d'élasticité statique et dynamique, et aux facteurs de durabilité par des essais de perméabilité, de porosité accessible à l'eau et de porosité au mercure .

Enfin, une étude plus approfondie à long terme des caractéristiques microstructurales et de durabilité des BAP peut être envisageable. En effet, les 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 pensons utile d'entreprendre des travaux de recherche qui permettront d'exploiter à l'échelle industrielle la vase du barrage de Chorfa et de Fergoug.



BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **OUCHI M., HIBINO M., OKAMURA H.**, « Effect of superplasticizer on self-compactibility of fresh concrete », Transportation research board, 76th annual meeting, washington DC, 12-16, 1997.
- [2] **AFGC** « Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants », (janvier 2008).
- [3] **KHAYAT K. H.**, «Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete», ACI Materials Journal, May, vol. 96, n° 3, p. 346-353, 1999.
- [4] **OKAMURA H., OUCHI M.**, «Self-compacting concrete. Development, present and future», Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 3-14, 13-15 septembre 1999.
- [5] **AFGC**, «Interim recommendations for use of Self-Compacting Concrete», Association Française de Génie Civil, 2002.
- [6] **AFGC** « Recommandations provisoires », document scientifique et technique (juillet 2000)
- [7] **EFNARC**, Specifications and guidelines for self-compacting concrete, février 2002.
- [8] **TURCRY P.**, « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation », Thèse de doctorat en Génie Civil, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, le 3 février 2004.
- [9] **ADAM N.**, « Propriétés des bétons », traduit par le CRIB (Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, Sherbrooke - Laval), septembre 2000.
- [10] **BOUHAMOU N.** « Influence des rapports eau/ciment et fines/ciment sur le comportement à l'état frais et durci du béton autoplaçant à base de matériaux locaux Algériens». Thèse de Doctorat, Université de Mostaganem, Algérie. (2008)
- [11] **JOSSERAND L.** «Ressuage des bétons hydrauliques », Thèse de doctorat en Structures et MatériauX, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, le 11 octobre 2002.
- [12] **YURIGI M, SAKATA N, IWAI M, SAKAI G.**, «Mix design for highly workable concrete », Conference concrete 2000, Dundee, 7-9 September 1993, p11.
- [13] **NF EN 934-2**, « Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 2 : Adjuvants pour bétons – Définitions, spécifications et critères de conformité.
- [14] **SEDRAN T.**, « Les LCPC 196, réf. Bétons Autonivelants », Bulletin 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.
- [15] **PETERSSON P., BILLBERG P., VAN B. K.**, «A model for self-compacting concrete». In Proceedings of International RILEM Conference on Production methods and workability of concrete. RILEM, 1999.
- [16] **KHAYAT, K.H., GAHEZAL, A., HADRICHE M.S.**, “Factorial design models for proportioning self-consolidating concrete”, Materials and Structures Journal, vol. 32, p. 679-686, 1999.
- [17] **OH S.G., NOGUCHI T., TOMOSAWA F.**, «Towards mix design for rheology of self-compacting concrete», First Int. Symposium on SCC, Stockholm, Edited by Skarendahl and Petersson, RILEM publications PRO 7, Cachan, p. 361-372, 1999.
- [18] **ABDI B.**, « La durabilité des bétons autoplaçants destinés à la réparation des infrastructures », Mémoire de maîtrise es sciences appliquées, Spécialité : génie civil, Sherbrooke Québec, Canada, 2005.

- [19] **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.
- [20] **BETHMONT S.**, « Mécanismes de ségrégation dans les BAP ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 2005.
- [21] **MATSUOKA S.**, «Development of combinaison type Self-Compacting Concrete and Evaluation Test Methods», Journal of Advanced Concrete technology, 2003, vol 1, n°1, pp 26-36.
- [22] **BILLBERG P.**, “Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration”, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 285-294, 23-25 october 2001.
- [23] **BARON J., OLLIVIER J. P.**, «Les bétons bases et données pour leur formulation». Edition Eyrolles. Deuxième tirage, 1997.
- [24] **GUEMMADI Z., ESCADEILLAS G., TOUMI B., HOUARI H. ET CLASTRES P.**, « Influence des fillers calcaires sur les performances mécaniques des pates de ciments », 1^{er} congrès international sur la technologie et la durabilité du béton CITEDUB 1, USTHB Alger, mai 2004
- [25] **KHAYAT K.H.**, «Use of viscosity-modifying admixture to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete», ACI Material journal, vol.95 N°2, 1998.
- [26] **TRAETTEBERG A.**, “Silica Fume as a Pozzolanic Material”, Il Cimento 75-3, 369-375, 1978.
- [27] **GNIEWEK J.**, « Réactivité des Montmorillonites calcinées. Utilisation dans le génie civil », Thèse INSA de Lyon, 184p, (1987).
- [28] **BRINDLEY G.W., SHARP J.H., PATTERSON J.H., Narahari A.** “Kinetics and mecanism of dehydroxylation processes”, American Mineralogy, vol. 52, p201-211, 1967.
- [29] **SAMET B. and al**, “Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements Formulation of blended cement”, Cement and Concrete composite, Vol.29, p741-749, 2007.
- [30] **ZHU W., GIBBS J.C.**, «Use of different limestone and chalk powders in self compacting concrete». Cement and Concrete Research, Vol. 35, Nbr 8 :1457-1462, 2005.
- [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, Sweden, pp. 199-209, 13-15 september 1999.
- [32] **SONEBI M., 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, pp. 275-289, 13-15 september 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, october 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, august 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, november 2002.

- [36] **DOMONE P.L.**, “Self-compacting concrete: an analysis of 11 years of case studies”, *Cement and Concrete Composites*, 28, 197-208, 2006.
- [37] **SONEBI M., BAHADORI-JAHROMI, A., BARTOS, P.J.M.**, «Development and optimization of medium strength self-compacting concrete by using pulverized fly ash», 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 514-524, 2003.
- [38] **PARK C.K., NOH M.H., PARK T.H.**, «Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures», *Cement and Concrete Research*, 35, 842-849, 2005.
- [39] **SHADLE, R., AND SOMERVILLE, S.**, «The Benefits of Utilizing Fly Ash in Producing Self-Compacting Concrete». First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, IL: ACBM, 235-241, 2002.
- [40] **FERRARIS C F., OBLA K H. et HILL R H.**, “Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete”, *Cement and concrete research*, vol 31, pp245-255, 2001.
- [41] **DINAKAR P., BABU K.G., SANTHANAM M.**, «Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes», *Cement and Concrete Composites*, 30, pp. 880–886, 2008.
- [42] **FELEKOGLU B., YARDIMCI M., BARADAN B.**, «A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self compacting concrete», *Proceeding of Third International Symposium on SCC: Reykjavik* 446-455, 2003.
- [43] **KOEHLER E.P.**, «Aggregates in Self-Consolidating Concrete». Thèse de doctorat. The University of Texas at Austin, 2007.
- [44] **OBLA K.H., HILL R.H., THOMAS M.D.A., SHASHIPRAKASH, S.G., AND PEREBATOVA, O.** «Properties of Concrete Containing Ultra-Fine Fly Ash», *ACI Materials Journal*, 100(5), 426-433, 2003.
- [45] **PATEL, R., HOSSAIN, K.M.A., SHEHATA, M., BOUZOUBAA, N., AND LACHEMI, M.** «Development of Statistical Models for Mixture Design of High-Volume Fly Ash Self-Consolidating Concrete», *ACI Materials Journal*, 101(4), 294-302, 2004.
- [46] **CHRISTENSEN, B.J., and ONG F.S.**, «The Performance of High-Volume Fly Ash Self-Consolidating Concrete,» *Proceedings of SCC*, Chicago, IL: ACBM, 2005.
- [47] **KHATIB J.M.**, «Performance of self-compacting concrete containing fly ash», *Construction and Building Materials* 22, 1963–1971, 2008.
- [48] **SHI, TANIGAWA Y., MORI H., KUROKAWA Y.**, «A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste», *Transactions of the Japan Concrete Institute*, vol 20, pp 9-14, 1998.
- [49] **SENHADJI Y.** « L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfates) » Thèse de doctorat Université USTO – Oran ALGERIE, 2013.
- [50] **MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M.**, «Concrete: Structure, Properties and Materials», Englewood Cliffs, NJ; Prentice Hall, 548, 1993.
- [51] **MENENDEZ G. and al.**, “Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast furnace slag” *Cement and Concrete Research – Vol 25* , pp 61-67-2003.
- [52] **RACKEL S.N.**, « Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash » Thèse de doctorat, Université de Toulouse Paul Sabatier, mai 2001.

- [53] **HE C., OSBAECK B., MAKOVICKY E.**, “Pozzolanic reaction of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects”, cement and concrete research, Vol.25, 8, p1691-1702, 1995.
- [54] **GABORIAU H. GALLIAS J.L. LE BERRE P.** « Utilisation des poudres minérales naturelles ultrafines pour l’amélioration des performances des bétons » Congrès de la Société de l’industrie Minérales, Montpellier, France, 1996
- [55] **SABIR B., WILD S., BAI J.**, “Metakaolin and calcined clay as pozzolans for concrete”, Cement and concrete Research, Vol.23, 6, p441-451, 2001.
- [56] **BADOGIANNIS E., KAKALI G., DIMOPOULOU G., CHANIOTAKIS E., TSIVILIS S.**, “Metakaolin as a main cement constituent, Exploitation of poor Greek kaolins”, Cement and Concrete Composite, Vol.27, p197–203, 2005.
- [57] **MOULIN E., BLANC P., SORRENTINO D.**, “Influence of key cement chemical parameters on the properties of metakaolin blended cements”, Cement and Concrete Composites, Vol. 23, p463-469, 2001.
- [58] **KHATIB J.M., SABIR B.B., WILD S.**, “Some properties of metakaolin paste and mortar Concrete for environment enhancement and Protection”, Ed. Dhir R.K. and Dyer T.D., Spon press, London, 1996
- [59] **GUILLON.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’Ecole Normale Supérieure de Cachan, France 2004.
- [60] **ADENOT F., BUIL M.**, «Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water», Cement and Concrete Research 22, 259-272, 1992.
- [61] **KAMALI S.**, « Modélisation de la lixiviation de matériaux cimentaires, application à différents ciments dans différents environnements », Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2003.
- [62] **NGUYEN V.H., NEDJAR B., COLINA H., TORRENTI J.M.**, «A separation of scales analysis for the modelling of calcium leaching in concrete», Computer methods in applied mechanics and engineering, 195, 7196-7210, 2006.
- [63] **CARDE C., FRANÇOIS R.**, «Effect of ITZ leaching on durability of cement-based materials», Cement and Concrete Research 27, 971-978, 1997.
- [64] **ROZIERE E.**, « Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle », Thèse de doctorat, l’Ecole Centrale de Nantes, 2007.
- [65] **Kamali S., Gérard B., Moranville M.**, «Modelling the leaching kinetics of cement-based materials influence of materials and environment», Cement and Concrete Composites 25, 451-458, 2003.
- [66] **BADOZ C., FRANCISCO P., ROUGEAU P.**, «A Performance Test to Estimate Durability of Concrete Products Exposed to Chemical Attacks», Proceedings of the Second International Congress of FIB, June 5 -8, 2006.
- [67] **KOSTUCH J.A., WALTERS G.V., JONES T.R.**, “High performance concrete incorporating metakaolin”, Concrete 2000, University of Dundee, p. 1799-1811, 1993
- [68] **ROY D.M., ARJUNAN P., SILSBEE, M.R.**, Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete, Cement and Concrete Research, 2001, Vol.31, 12, p1809-1813

- [69] **RAHMANI H., RAMZANIANPOUR A.A.**, «Effect of silica fume and natural pozzolanas on sulfuric acid resistance of dense concretes». *Asian Journal of Civil Engineering (building and housing)* VOL. 9, Nbr. 3, pp 303-319, 2008.
- [70] **GHRICI M., KENAI S., SAID-MANSOUR M.**, «Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements», *Cement & Concrete Composites* 29 542–549, 2007.
- [71] **TAMIMI A. K.**, «High-performance concrete mix for an optimum protection in acidic conditions». *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 30, pp 188-191, 1997.
- [72] **GCI – 714** « Cours : Durabilité et Réparations du Béton », Université de Sherbrooke, CANADA, Juillet 2009.
- [73] **MEHTA P.K.**, «Sulfate Attack on Concrete” A Critical Review», *Materials Science of Concrete III*, The American Ceramic Society, pp. 105-130, 1993.
- [74] **SANTHANAM M., COHEN M; D., OLEK J.**, ‘Mechanism of sulfate attack: a fresh look Part 2. Proposed Mechanisms’. *Cement and Concrete Research* 33 ; 341–346. 2003.
- [75] **FERRARIS C.F., CLIFTON J.R., STUTZMAN P.E., GARBOCZI E.J.**, “Mechanisms of degradation of Portland cement-based systems by sulfate attack”, in: K.L. Scrivener, J.F. Young (Eds.), *Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-Based Systems*, E & FN Spon, London, pp. 185– 192. 1997.
- [76] **BROWN P.W.**, “An evaluation of sulfate resistance of cements in a controlled environment”, *Cement and Concrete Research*. (11): 719– 727. 1981.
- [77] **GOLOP R.S., TAYLOR H.F.W.**, «Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack, III. Sulfate resisting Portland cement: reaction with sodium and magnesium sulfate solutions», *Cement and Concrete Research*, vol.25, 8, p.1581-1590, 1995.
- [78] **SANTHANAM M., COHEN M.D., OLEK J.**, “Mechanism of sulfate attack: A fresh look: Part 1, Summary of experimental results”. *Cement and Concrete Research* 32 (6) 915– 921. 2002.
- [79] **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.
- [80] **SIAD H.**, «La durabilité des bétons autoplaçants à base des additions pouzzolaniques et fillers calcaires», Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed Boudiaf, 2010.
- [81] **RAMLOCHAN T., ZACARIAS P., THOMAS M.D.A., HOOTON R.D.**, “The effect of pouzzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 807–814, 2003.
- [82] **MESSAD S.**, « Mise au point d'un essai de vieillissement accéléré de l'attaque sulfatique externe pour l'application du concept de performance équivalente de la norme NF EN 206-1 », Thèse de doctorat de l’Université Paul Sabatier Toulouse III, 2009.
- [83] **PAPADAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N.**, “Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete”, *ACI materials journal*, vol. 88, n° 2, p. 186-196, 1991.
- [84] **PAPADAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N.**, “Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation”, *ACI Materials Journal*, V. 88, No. 4, July- August 1991.

- [85] **THIERY M., DANGLA P., VILLAIN G., PLATRET G., MASSIEU E., DRUON M., BAROGHEL-BOUNY V.**, « Modelisation de la carbonatation atmospherique des matériaux cimentaires », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 252-253, septembre-octobre-novembre-décembre, pp. 153-187, 2004.
- [86] **THIERY M.**, « Modelisation de la carbonatation atmospherique des materiaux cimentaires, Prise en compte des effets cinetiques et des modifications microstructurales et hydriques », Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées‘ LPC, OA 52, 2006.
- [87] **VAN BALEN K., VAN GEMERT D.**, “Modelling lime mortar carbonation”, Materials and Structures, n° 27, pp 393-398, 1994.
- [88] **SAETTA A.V., SCHREFLER B.A., VITALIANI R.V.**, “2-D Model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials”, Cement and Concrete Research, vol. 25, n° 8, pp 1703-1712, 1995.
- [89] **ROY S.K., POH K.B., NORTHWOOD D.O.**, “Durability of concrete, accelerated carbonation and weathering studies”, Building and Environment, 34, pp 597-606, 1999.
- [90] **BAROGHEL-BOUNY V.**, “Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons - Méthodes, Analyse, Interprétations’, (LCPC, Paris, France) décembre, 468 p, 1994.
- [91] **CHAUSSADENT T.**, « Analyse des mécanismes de carbonatation du béton » Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM Durabilité des bétons’. Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées a la durabilité’, pp 75-87, 1997.
- [92] **CHAUSSADENT T.**, ‘Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton arme’, Etudes et recherches des LPC, OA 29, septembre, 80 p, 1999.
- [93] **SAKATA K.**, «Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete», CONSEC 98, International Conference 2, pp.2057-2064, Tronso, GB, 1998.
- [94] **ASSIE S.**, «Durabilité des bétons autoplaçants», Thèse de doctorat, INSA Toulouse, 2004.
- [95] **BOEL V., AUDENAERT K., DE SCHUTTER G.**, «Experimental durability evaluation of self-compacting concrete with limestone filler», Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp. 297-303, 2005.
- [96] **DINAKAR P., BABU K. G., SANTHANAM M.**, «Corrosion resistance performance of high volume fly-ash self-compacting concretes». Magazine of Concrete Research, vol. 61, n°2, pp. 77-85, 2009.
- [97] **ROUGEAU P., BORYS B.**, « Réaliser des produits en béton à très hautes performances ou fibrés à ultra hautes performances avec des ultrafines autre que la fumée de silice », Rapport CERIB, p114, 2004.
- [98] **REMINE B.**, « Qualification du transport solide dans le bassin versant de l’oued Isser, application à l’envasement du barrage de Béni Amrane » 2ème CMEE Alger Octobre 2002.
- [99] **ANBT-MASCARA**, « Agence nationale des barrages et transferts », [2004-2005], [2007- 2011].
- [100]. **NOUGAR B.**, « Etude du comportement des sédiments issus du dragage en vue de leur stockage en attente de valorisation », Thèse de Magister, ENSET – Oran, Algérie, 2009.
- [101] **BESSEGHIER N.**, « Valorisation de la vase du barrage de Fergoug pour son utilisation dans le béton », Thèse de Magister, Université de Mostaganem, 2008.

- [102] **SEMCHA A.**, «Valorisation des sédiments de dragage: Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug», Thèse de doctorat à l'Université de Reims, 2006.
- [103] **BELGUESMIA K.**, « Comportement vis-à-vis des attaques sulfatiques et de la carbonatation d'un béton autoplaçant à base de sédiment de dragage », Thèse de Magister, Université de Mostaganem, 2011.
- [104] **FOUCAULT A., RAOULT J.F.** « Dictionnaire de géologie ». Editions Masson, Paris, ISBN 2-25-654661-1, 1980.
- [105] **SHNEIDER G.** «Le curage des sédiments des cours d'eau ». Le courrier de l'environnement de l'INRA, vol. 43, pp. 146-147, 2001.
- [106] **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, vol. 20, pp. 27-35, 1993.
- [107] **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, 2002, <http://www.eau-artoispicardie.fr/>.
- [108] **SCORDIA P. Y.**, «Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers», Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de LILLE, P 7-23, 2008.
- [109] **BOUCARD L.**, « Valorisation de sédiments fluviaux stabilisés». Thèse de l'Université de Lille, 2006.
- [110] **BELARIBI O., BELAS N., AGGOUN S., BELGUESMIA K., SAFER O.**, « Influence des vases de dragage sur les résistances mécaniques des mortiers ». 1st International Conference on Civil Engineering, Laghouat University, Algeria, 06-07 November 2012.
- [111] **BELARIBI O., BELAS N., AGGOUN S., BENDANI K., BOUHAMOU N., MEBROUKI A.**, "Enhancing the value of dam dredged sediments as a component of a self compacting concrete" Magazine Cement Wapno Beton no 6, p. 370, November-December 2014.
- [112] **DUPAIN R., LANCHON R. et SAINT ARROMAN J.C.**, « Granulat, Sols, Ciments et Bétons», caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire », 2^{ème} édition conforme aux normes européennes, édition éducative, pp 235, 1995.
- [113] **BELAS BELARIBI N., SEMCHA A., LAOUFI L.**, "Influence of the Beni-Saf pozzolana on the mechanical characteristics of the concretes". Canadian Journal of Civil Engineering; 30(3): 580–4. 2003.
- [114] **MEBROUKI A., CYR M., BOUHAMOU N., BELAS BELARIBI N.**, 'Valorisation de matériaux locaux-Etude du comportement mécanique de mortiers incorporant une pouzzolane naturelle algérienne », Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, 3: p.29–36, Juin 2006.
- [115] **EZZIANE K., BOUGARA A., KADRI A., KHELAFI H., KADRI E.**, "Compressive strength of mortar containing natural pozzolana under various curing temperature". Cement and Concrete Composites; 29 (8): 587–93, 2007.
- [116] **MOULI M., KHELAFI H.**, "Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolana". Building and Environment, 43 (1): 31–6, 2008.
- [117] **BELARIBI O.** « Comportement d'un béton autoplaçant vis-à-vis des attaques chimiques », Thèse de Magister, USTMB-Oran, Algérie, 2009.

- [118] **ASSOCIATION FRANÇAISE DE GENIE CIVIL**, « Documents scientifiques et techniques, recommandation pour l'emploi des bétons autoplaçants », IREX, Janvier 2008.
- [119] **BASSUONI, M.T. AND NEHDI, M.L.**, «Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction», *Cement and Concrete Research*, 37(7), pp.1070–1084, 2007.
- [120] **ASTM C267**, “Chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer Concretes”. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2001.
- [121] **ASTM C 1012- 95A**, “Standard test method for length change of hydraulic cement mortars exposed to a sulfate solution”, *Annual Book of ASTM Standards*, volume 04.01 cement; lime; gypsum, 2004.
- [122] **MEHTA P.K.**, «Evaluation of sulfate resisting cements by a new test method », *Journal ACI*. 72 (40), pp. 573-575, 1975.
- [123] **PAPADAKIS V. G.**, «Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress», *Cement and Concrete Research* 30, 291-299, 2000.
- [124] **AFPC-AFREM**, « Durabilité des bétons – Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité », In GranDuBé, Journées Techniques, Toulouse, 1997.
- [125] **JIANG S. AND VAN DAMME H.**, « Influence des fillers de nature différente sur l'hydratation et la texture des pâtes de C₃S », Rapport de CRMD-ATILH, Université d'Orléans, 1996.
- [126] **KADRI E. H., DUVAL R.**, “Hydration heat kinetics of concrete with silica fume”, *Construction and Building Materials* 23, 3388–3392, 2009.
- [127] **KHELIFA R., BRUNETAUD X., ALMUKHTAR M.**, « Conséquences mécaniques de l'attaque sulfatique externe sur des bétons autoplaçants », XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Nancy, 4 au 6 juin 2008.
- [128] **JAUBERTIE. R.**, « Dégradations de mortiers sous différents milieux sulfatiques », *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics* Septembre-Octobre 1999.
- [129] **YU Q., SAWAYAMA K., SUGITA S., SHOYA M., SOJIMA Y.**, “The reaction between rice husk ash and Ca(OH)₂ solution and the nature of its product”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 37-43, 1999.
- [130] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS**, «Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes», ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1997.
- [131] **SAYAMIPUK S.**, “Strength and durability of mortars containing métakaolin from Thailand” PhD Thesis, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, 2001.
- [132] **GHRICI M., KENAI S. and MEZIANE E.**, “Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana”, *Journal of Materials Science*. 41:6965–6972, 2006.
- [133] **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.
- [134] **SULAPHA P., WONG S.F., WEE T.H., SWADDIWUDHIPONG S.**, «Carbonation of concrete containing mineral admixtures». *J. Mater. Civil Eng.*; 134–43, 2003.
- [135] **SISOMPHON K., FRANKE L.**, «Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials», *Cement and Concrete Research*, pp. 1647–1653, 2007.



ANNEXES

PLASTIMENT® BV 40

Plastifiant/Réducteur d'Eau pour hautes résistances mécaniques.



Conforme à la norme NF EN 934-2

Présentation

Le PLASTIMENT® BV 40 est un plastifiant réducteur d'eau énergétique qui :

- augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et de l'imperméabilité,
- facilite la mise en place du béton,
- permet éventuellement de réduire le dosage en ciment,
- permet d'obtenir un retard de début de prise plus ou moins important en augmentant le dosage normal d'utilisation de béton à performances élevées, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Domaines d'application

1. Augmentation des résistances mécaniques.

Le PLASTIMENT® BV 40 permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10 % sans diminuer la maniabilité du témoin. Des essais sont indispensables pour déterminer la quantité d'eau de gâchage nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée. La compacité et l'imperméabilité sont améliorées. Les résistances mécaniques à long terme sont augmentées en moyenne de 15 à 40 %.

Le PLASTIMENT® BV 40 est donc particulièrement indiqué pour :

- les bétons armés à hautes performances,
- les bétons précontraints,
- les bétons préfabriqués étuvés.

2. Réduction du dosage en ciment.

Le PLASTIMENT® BV 40 permet de réduire le dosage en ciment de l'ordre de 10% en conservant les résistances mécaniques.

Il est utilisé dans ce cas en B.P.E. pour la confection de béton à la résistance.

3. Amélioration de la maniabilité.

Le PLASTIMENT® BV 40 permet d'améliorer la maniabilité à teneur en eau constante, tout en apportant une augmentation des résistances à long terme de 10 % environ.

Il est donc utilisé pour la confection de pièces élancées, fortement ferrallées et dans le cas de bétons pompés.

4. Augmentation du délai de mise en œuvre.

A dosage élevé, le PLASTIMENT® BV 40 augmente le temps de prise du béton. La température jouant un rôle important, il est bon de procéder à des essais. A titre indicatif :

- à 20°C, on obtient un retard de prise de 3 à 4 heures environ avec 0,6 %.
- à 5°C, le même dosage provoque un retard de prise de l'ordre de 8 h.

Le PLASTIMENT® BV 40 est compatible avec nos entraîneurs d'air SIKA AER et SIKA AER5.

Cette combinaison conduit à :

- l'amélioration des résistances aux cycles gel-dégel,
- la possibilité de coulage en continu (béton extrudé, béton routier),
- l'amélioration des résistances de tous bétons situés dans les zones de marnage.



Le PLASTIMENT® BV 40, grâce à ses propriétés physico-chimiques permet :

Sur béton frais :

- d'augmenter considérablement la maniabilité même en réduisant l'eau de gâchage,
- de disperser le ciment dans la masse,
- d'améliorer l'adhérence béton-armatures,
- de s'opposer à la ségrégation,
- d'améliorer la thixotropie,
- d'étaler éventuellement la prise.

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques,
- d'accroître la compacité,
- d'augmenter l'imperméabilité,
- de diminuer le retrait et le fluage.

Le PLASTIMENT® BV 40 est compatible avec tous les ciments et en particulier le ciment fondu.

Caractéristiques

Coloris	Brun foncé
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none">■ Tonnelet de 30 litres■ Fût de 250 kg■ Conteneur perdu de 1000 litres■ Vrac
Stockage	Le PLASTIMENT® BV 40 gèle à - 5°C environ. En cas de gel prolongé et intense, vérifier s'il n'a pas été déstabilisé.
Conservation	Dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans.
Données techniques	
Densité	1,180 ± 0.015
pH	4,5 ± 1
Extrait sec	38,5 ± 1,9 %
Teneur en ion Cl ⁻	≤ 0,1 %
Teneur en Na ₂ O éq.	≤ 2 %

Temps de prise (NF EN 480-2)	CEM I 52,5 PM ES CP2 Le Teil		CEM I 52,5 Gargenville	
	20°C	5°C	20°C	5°C
PLASTIMENT® BV40 0,5%	11 h 00	15 h 00	10 h 00	22 h 00
PLASTIMENT® BV40 1,25%	24 h 00	26 h 00	20 h 00	33 h 00



Conditions d'application

Dosage

Le dosage précis du PLASTIMENT® BV 40 est fonction des conditions de chantier et de l'effet recherché.

Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 1% du poids du ciment.

Comme retardateur : à partir de 0,5% du poids du ciment.

Son dosage exact se détermine sur chantier en procédant à quelques essais puisqu'il est fonction de la nature des composants du béton, des qualités recherchées (compacité, plasticité) et des conditions climatiques.

Ne pas dépasser 1% sans essai préalable : possibilité de retard de prise important.

Mise en œuvre

Introduire le PLASTIMENT® BV 40 dans l'eau de gâchage.

Précautions d'emploi

Manipulation non dangereuse.

En cas de contact avec la peau, un simple lavage suffit.

Consulter la fiche de données de sécurité accessible sur Internet www.sika.fr

Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika France S.A.
84, rue Edouard Vaillant – BP 104
93351 Le Bourget Cedex
France

Tel. : 01 49 92 80 00
Fax : 01 49 92 80 21
www.sika.fr

Organisme de certification :
AFNOR CERTIFICATION
11, avenue Francis de Pressensé
93571 Saint-Denis La Plaine cedex
France

Notice technique
Edition octobre 2006
Numéro 2.11
Version n°136.2006 R 001
SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.



Présentation SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

Domaines d'application

- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplacants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplacants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

Caractères généraux SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- longue rhéologie (>2h),
- robustesse à la ségrégation,
- qualité de parement.



Caractéristiques

Aspect	Liquide brun clair
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fûts de 230 kg ■ CP de 1000 L ■ Vrac
Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Conservation	1 an en emballage intact
Données techniques	
densité	1,06 ± 0,01
pH	6 ± 1
Teneur en Na ₂ O Eq.	≤ 1 %
Extrait sec	30,2 ± 1,3 %



Teneur en ions Cl⁻	≤ 0,1 %
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.
Mise en œuvre	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité.
Mentions légales	Produit réservé à un usage strictement professionnel Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA® a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»

Organisme de certification :
AFNOR CERTIFICATION
11, avenue Francis de Pressensé
93571 Saint-Denis La Plaine cedex
France



Sika El Djazair.
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus
Alger/ ALGERIE
www.sikaeldjazair.com

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84
213 (0) 21 50 16 92 à 95
Fax: 213 (0) 21 50 22 08
Email: sika.commercial@dz.sika.com

