



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
Faculté des Sciences et de la Technologie



N° d'ordre :/GCA/2018

THÈSE DE DOCTORAT
Es Sciences

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux et durabilité des constructions

Thème

**« OPTIMISATION D'UN ÉCO-BAP À BASE DE SÉDIMENT DE
DRAGAGE VIS-À-VIS DES ÉTATS FRAIS, DURCI ET DE LA
DURABILITÉ »**

Présentée par :

BELGUESMIA Khalil

Soutenue le / / 2018 devant le jury composé de :

BENDANI Karim	Pr	Président	Université de Mostaganem
MALAB Souad	MCA	Examinatrice	Université USTOMB
EZZIANE Mohamed	MCA	Examineur	ENP d'Oran
BELAS Nadia	Pr	Encadrant	Université de Mostaganem
AMIRI Ouali	Pr	Co-Encadrant	Université de Nantes
LEKLOU Nordine	MC-HDR	Invité	Université de Nantes

Année Universitaire : 2017 / 2018

Dédicace

Je voudrais dédier ce modeste travail à :

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

Mes chers frères et sœurs : Mohamed, Oualid, Sabiha et Ikram.
Mes chers amis (es) spécialement Omar, Salim, Mourad, Mansour,

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

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

BELGUESMIA KHALIL

Remerciements

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

J'adresse aussi mes vifs remerciements :

A mon encadrant le Professeur BELAS BELARJIBI Nadia et mon co-encadrant le Professeur AMIRI Ouali ainsi que M. LEKLOU Nordine pour leur aide et leur disponibilité.

Aux membres du jury, en l'occurrence le Pr BENDANI Karim d'avoir présidé le jury, Mme MALAB Souad et M. EZZIANE Mohamed pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette recherche en acceptant d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs critiques et propositions.

Mes remerciements vont également à toute l'équipe IEG du laboratoire GeM de l'IUT de Saint-Nazaire (France) pour leur accueil et leur aide et aux ingénieurs et techniciens des cimenteries Zahana et Lafarge ainsi au technicien du laboratoire de matériaux et géotechnique de l'IGCMO Oran, de la carrière TRACE, à ceux des sociétés Sika Algérie et GRANITEX, et à Khalifa Belkacem.

Ainsi qu'à toute personne ayant de près ou de loin contribué à l'élaboration de ce présent mémoire.

Merci

Sommaire

Sommaire	
Listes des figures.....	
Liste des tableaux	
Résumé	
Abstract.....	
Introduction générale.....	

Partie I : Etude bibliographique

Chapitre I : Les BAP: Formulation et Caractérisation	4
I.1 Introduction	4
I.2 Caractérisation à l'état frais.....	5
I.2.1 Essai d'étalement (Slump flow)	5
I.2.2 Essai J-Ring (Essai des anneaux japonais).....	6
I.2.3 Essai de la boîte en L.....	7
I.2.4 Essai de stabilité au tamis.....	8
I.2.5 Le ressuage.....	9
I.3 Formulation des BAP.....	10
I.3.1 Méthode basée sur l'optimisation du mortier.....	14
I.3.2 Méthode basée sur l'optimisation de la quantité de pâte	15
I.3.3 Méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire	16
I.4 Mortier de béton équivalent.....	17
I.4.1 Corrélation entre béton et MBE	18
I.4.2 Principe de surface développée par les granulats.....	20
I.4.2.1 Cas 1 :.....	21
I.4.2.2 Cas 2 :.....	23
I.4.2.3 Cas 3 :.....	24
I.4.3 Caractérisation du MBE à l'état fait :	24
I.5 Propriétés mécaniques des BAP :	24
I.5.1 Résistance mécanique	25
I.5.2 Module d'élasticité (en compression) :	26

I.5.3	Le Retrait (état frais, état durci)	27
I.5.3.1	Le retrait de dessiccation :.....	28
I.5.3.2	Le retrait plastique :.....	28
I.5.3.3	Le retrait thermique :.....	29
I.5.3.4	Le retrait endogène (dit d'auto-dessiccation) :.....	29
I.5.3.5	Le retrait de carbonatation :	29
I.6	Conclusion.....	30
 CHAPITRE II : DURABILITE ET PROPRIETES DE TRANSFERT		32
II.1	Introduction	32
II.2	La Durabilité des BAP	32
II.3	Propriétés de transfert	33
II.3.1	La porosité.....	33
II.3.2	La Perméabilité	35
II.3.3	La diffusion	38
II.3.3.1	Description phénoménologique de la pénétration des chlorures.....	39
II.3.3.2	Détermination du coefficient de diffusion sous champ électrique.....	39
II.3.3.3	Ions chlore dans les matériaux cimentaires.....	39
II.3.3.4	Fixation des chlorures dans les gels de C-S-H.....	40
II.3.3.5	Fixation des chlorures par réaction avec les aluminates	40
II.3.3.6	Chlorures cristallisés	41
II.4	Conclusion.....	41
 CHAPITRE III : LES ADDITIONS MINERALES		42
III.1	Introduction	42
III.2	Les additions minérales dans les BAP	42
III.3	Les pouzzolanes	46
III.3.1	Caractéristiques des pouzzolanes	47
III.3.2	L'activité pouzzolanique	48
III.4	Les produits d'hydratation du Clinker	49
III.4.1	Les produits de la réaction pouzzolanique	49
III.4.2	Etudes relatives à la Pouzzolane Naturelle	50
III.4.2.1	Exemple de la pouzzolane de Beni-saf	50
III.5	Conclusion.....	52

CHAPITRE IV : LES SEDIMENTS DE DRAGAGE	53
IV.1 Introduction	53
IV.2 Définition et origine.....	53
IV.3 Constitution des sédiments	54
IV.4 Granulométrie des sédiments	56
IV.5 Le dragage des sédiments	57
IV.6 La valorisation des sédiments :	58
IV.6.1 Critères de valorisation des sédiments de dragage :.....	59
IV.6.2 Valorisation comme constituant du ciment :.....	61
IV.7 Présentation du barrage Chorfa	64
IV.8 Conclusion :	66
PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF DE LA RECHERCHE	68

Partie II : Matériaux et Programme expérimental

Chapitre I : MATERIAUX UTILISES	71
I.1 Introduction	71
I.2 Le ciment.....	71
I.3 Notion du liant equivalent	74
I.4 La vase de dragage	74
I.4.1 Caractéristique physiques de la vase	76
I.4.2 Indice d'activité Pouzzolanique	79
I.5 Les adjuvants	80
I.6 Les granulats.....	81
I.7 Conclusion.....	83

CHAPITRE II : PROGRAMME EXPERIMENTAL	85
II.1 Introduction	85
II.2 Caracterisation de la vase chorfa.....	85
II.2.1 Diffraction des Rayons X (DRX).....	85
II.2.2 Essai Chapelle modifié.....	87
II.2.3 Microcalorimétrie Isotherme.....	89
II.3 Essais sur coulis	90
II.3.1 Le cône de Marsh	90

II.3.2	L'étalement au mini-cône :	91
II.4	Carcterisation du MBE.....	92
II.5	Caracteristion des BAP à l'état frais	93
II.5.1	Etat frais	95
II.6	Etat durci	97
II.6.1	Résistance à la compression.....	97
II.6.2	Contrôle de ségrégation statique (Essai de la colonne).....	98
II.7	Mesure du retrait	98
II.8	Mesure de porosité	100
II.8.1	Porosité accessible à l'eau (Porosité totale)	100
II.8.2	Porosimétrie au Mercure	101
II.9	Permeabilite au gaz	103
II.10	Diffusion des chlorures	106
II.11	Conclusion.....	109

Partie III : Résultats et Analyses

CHAPITRE I : CARACTERISATION DE LA VASE ET FORMULATION

MBE	110
I.1	Introduction	110
I.2	Potentiel pouzzolanique de la vase chorfa	110
I.2.1	Analyse DRX	110
I.2.2	Indice d'activité Pouzzolanique	113
I.2.3	Essai Chapelle Modifié	114
I.2.4	Essai au microcalorimètre	116
I.3	Essais sur coulis	119
I.3.1	Caractérisation des coulis au cône de Marsh et au mini-cône.....	120
I.4	Formulation du MBE.....	124
I.4.1	Equivalence par les volumes des granulats	125
I.4.2	Equivalence par les surfaces des granulats	126
I.4.3	Performances mécaniques du MBE	136
I.5	Conclusion.....	139

CHAPITRE II : ETAT FRAIS ET ETAT DURCI..... 140

II.1	Introduction	140
II.2	Les formulations des BAP	140
II.3	Caractéristiques à l'état frais	142
II.4	Caracterisation à l'etat durci	148
II.4.1	Contrôle de la ségrégation.....	148
II.4.2	Résistances à la compression	149
II.5	Le retrait	151
II.5.1	Le retrait total	153
II.5.2	Le retrait endogène.....	154
II.5.3	Le retrait de dessiccation.....	155
II.6	Conclusion.....	157
 CHAPITRE III : DURABILITE ET PROPRIETES DE TRANSFERT ..		158
III.1	Introduction	158
III.2	Mesure de porosite	158
III.2.1	Porosité accessible à l'eau.....	158
III.2.2	Porosimétrie par intrusion de mercure	159
III.3	Permeabilite au gaz	161
III.4	Migration des chlorures.....	163
III.5	Conclusion.....	164
 CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....		165
 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		
 ANNEXES		

Liste des figures

Figure I.1:Essai d'étalement au cône (slump flow) [4].....	6
Figure I.2: J-Ring (Anneau Japonais) [5].....	6
Figure I.3: Essai de la boîte en L [4].....	7
Figure I.4: l'essai de stabilité au tamis [4].....	8
Figure I.5: Action des superplastifiants	12
Figure I.6: Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [17].	13
Figure I.7: Illustration de l'effet filler [18].	13
Figure I.8: Principe de formulation des MBE [54].	17
Figure I.9 : Exemple de corrélation entre l'étalement du MBE et l'affaissement du béton [54].....	19
Figure I.10: Corrélation entre étalement MBE/ étalement BAP [52].	19
Figure I.11: Relation entre les diamètres finaux d'étalement- Béton/MBE [64].....	20
Figure I.12: Cône d'Abrams et mini-cône.	24
Figure I.13: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV correspondant [32].....	25
Figure I.14: Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [27].....	26
Figure I.15: Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment.	28
Figure II.1: Profil des vitesses d'un fluide visqueux dans un tube capillaire [83].....	36
Figure II.2: Profil des vitesses d'un gaz dans un tube capillaire [83].....	36
Figure II.3: Résultats obtenu à partir de mesures expérimentales d'un béton ordinaire [89].	37
Figure III.1: Diagramme de Keil (Zone des pouzzolanes dans le système CaO – SiO ₂ – Al ₂ O ₃) [62]	48
Figure IV.1: Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins [74].	57
Figure IV.2: engin mécanique de dragage [73].	57
Figure IV.3: résistances mécaniques des mélanges.	61
Figure IV.4 : Resistance mécanique à la compression des pates de sédiments calcinés/ciment [Benamara].	63
Figure IV.5: Situation donnée par satellite du barrage Chorfa II.....	65
Figure IV.6: Vue générale du barrage Chorfa II.....	65

Figure IV.7: Vue du coté interne de la digue du barrage Chorfa II	66
Figure IV.8: La digue du barrage Chorfa II	66
Figure I.1: Four de calcination utilisé (+ 1200°C)	75
Figure I.2: La vase de Chorfa à l'état naturel, séchée, broyée, tamisée, et calcinée.....	75
Figure I.3: Pycnomètre de Le Châtelier.	77
Figure I.4: Essais de consistance normale et de prise par l'appareil de Vicat	77
Figure I.5: Perméabilimètre de Blaine automatique et manuel de la cimenterie LAFARGE..	78
Figure I.6: Distribution granulométrique des grains de la vase Calcinée	78
Figure I.7: Grains de vase calcinée observé au MEB (×1500)	79
Figure I.8: Courbes granulométriques des sables de mer, de carrière et les graviers	82
Figure II.1: Schéma d'un diffractomètre [44].	86
Figure II.2: Le porte échantillon.	87
Figure II.3: L'appareil de diffractomètre D8 Advance.	87
Figure II.4: Appareil ATG Appareil METTLER TOLEDO TGA/DSC.....	88
Figure II.5: Exemple principaux pic DTG pour un mélange à base de ciment et de fines calcaires [81]	89
Figure II.6: microcalorimètre isotherme multi-canal.....	90
Figure II.7: Le cône de Marsh	91
Figure II.8: Mini-cône pour la mesure de l'étalement.....	92
Figure II.9: Mini-cône à mortier	93
Figure II.10: Organigramme des séquences de malaxage des BAP	94
Figure II.11: Paramètres de l'essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow).....	95
Figure II.12: Paramètres de l'essai de la boîte en L.....	96
Figure II.13: Paramètres de l'essai J-Ring	96
Figure II.14: Principe de l'essai de colonne.....	98
Figure II.15: Déformètre pour la mesure du retrait.....	99
Figure II.16: Pénétromètre	101
Figure II.17: Porosimètre à mercure AUTOPORE IV de Micromeritics	103
Figure II.18: Schéma de l'essai de perméabilité au gaz [81]	104
Figure II.19: Schéma de l'essai de migration des Chlorures [81].....	107
Figure II.20: Cellules de migration des chlorures.....	108
Figure II.21: Appareil de titrage automatique.....	108
Figure I.1: Diffractogramme des rayons X de la vase Chorfa brute.	110
Figure I.2: Diffractogramme des rayons X de la vase Chorfa calcinée.	112

Figure I.3: Diffractogrammes des rayons X de la vase brute et la vase calcinée.....	113
Figure I.4 :DTG des mélanges chaux et vase brute.....	115
Figure I.5 : DTG des mélanges chaux et vase calcinée.....	115
Figure I.6: DTG des mélanges chaux+ vase calcinée et chaux + vase brute	116
Figure I.7: Flux thermiques et chaleurs dégagées des pâtes à base de vase brute	117
Figure I.8: Flux thermiques et chaleurs dégagées des pâtes à base de vase calcinée	118
Figure I.9: Essais de consistance normale sur pâte de ciment et pâte de vase calcinée.....	119
Figure I.10: Exemple de galette formée par un coulis témoin.....	122
Figure I.11: Exemple de galette formée par un coulis de 15% de vase	122
Figure I.12: Exemple de galette formée par un coulis de 30% de vase	122
Figure I.13: Galettes MBE résultantes de l'équivalence par les volumes des granulats	126
Figure I.14: Galette obtenue à partir de la formulation basée sur la méthode d'équivalence par les surfaces des granulats	131
Figure I.15: Galette du MBE finale	133
Figure I.16: Etalement des BAP avec respectivement 0.7%, 1% et 1.3% de Sp.....	134
Figure I.17: Évolution de l'étalement du BAP en fonction du dosage en sp.....	134
Figure I.18: Etalement des MBE avec respectivement 0.7%, 1% et 1.3% de Sp	135
Figure I.19: Évolution de l'étalement du MBE en fonction du dosage en sp	135
Figure I.20: L'étalement du MBE en fonction de l'étalement du BAP.....	136
Figure I.21: Évolution de la résistance à la compression des BAP à 28j en fonction du dosage en Sp.....	137
Figure I.22: Évolution de la résistance à la compression des MBE à 28j en fonction du dosage en Sp.....	137
Figure I.23: Résistance à la compression du MBE et BAP à 28j en fonction du dosage en Sp	138
Figure I.24: Les résistances à la compression du MBE en fonction du BAP pour les mêmes dosages en Sp	138
Figure II.1: Aspect de la galette d'étalement	143
Figure II.2: Essai de la boîte en L	144
Figure II.3: Aspect de l'essai de la stabilité au tamis	144
Figure II.4: Aspect de l'essai J-Ring.....	145
Figure II.5: Essai de ressuage.	145
Figure II.6: Topo sur les résultats de caractérisation à l'état frais	146
Figure II.7: Observation de la répartition des granulats pour les 4 BAP.....	148

Figure II.8: Courbes d'évolution des résistances à la compression des BAP	149
Figure II.9: Histogrammes de l'évolution des résistances mécaniques des BAP	150
Figure II.10: évolution du retrait total, endogène et de dessiccation pour le BAP T.....	151
Figure II.11: évolution du retrait total, endogène et de dessiccation pour le BAP-V 10%....	152
Figure II.12: évolution du retrait total, endogène et de dessiccation pour le BAP-V 20%	152
Figure II.13: évolution du retrait total, endogène et de dessiccation pour le BAP-V 30%	152
Figure II.14: Retrait total des quatre BAP en fonction du temps.....	153
Figure II.15: Perte de masse totale des quatre BAP en fonction du temps	153
Figure II.16: Retrait endogène des quatre BAP en fonction du temps	154
Figure II.17: Perte de masse endogène des quatre BAP en fonction du temps.....	155
Figure II.18: Retrait de dessiccation des quatre BAP en fonction du temps	156
Figure II.19: Perte de masse de dessiccation des quatre BAP en fonction du temps.....	156
Figure III.1: Porosité accessible à l'eau des quatre BAP en fonction du temps	159
Figure III.2: Volume cumulé des pores des quatre BAP	160
Figure III.3: Distribution porale des quatre BAP.....	160
Figure III.4: Coefficients de perméabilité apparente	161
Figure III.5: Coefficients de perméabilité intrinsèque	162
Figure III.6: Coefficients de diffusion effectifs des 4 BAP	163

Liste des tableaux

Tableau I.1: Exemple de gravillons.....	21
Tableau III.1: Domaine élargi des compositions des pouzzolanes naturelles [62].....	47
Tableau IV.1: Classes granulométriques d'un matériau [72].	56
Tableau IV.2 : Analyse chimique de la vase Fergoug [Benamara].....	62
Tableau IV.3 : Composition chimique des matériaux argileux bruts en % [Bibi].....	63
Tableau IV.4 : composition minéralogique des matériaux argileux bruts en % [Bibi].....	64
Tableau IV.5 : Résistance à la compression simple des mortiers et bétons à base de ciments composés de matériaux argileux calcinés [34].....	64
Tableau I.1: Composition chimique du ciment utilisé.....	72
Tableau I.2: Composition minéralogique du clinker.....	72
Tableau I.3: Caractéristiques physiques du CPA CEM1 42.5.....	73
Tableau I.4: Caractéristiques mécaniques du mortier normal du ciment CEMI 42.5.....	73
Tableau I.5: Caractéristiques chimiques de la vase calcinée.....	76
Tableau I.6: Valeurs de l'indice et du coefficient d'activité de la vase calcinée.....	80
Tableau I.7: Constituants utilisés du squelette granulaire.....	81
Tableau I.8: Récapitulatif des caractéristiques physiques des sables et graviers utilisés.....	82
Tableau I.9: Analyse chimique du sable de mer de Sidi-Lakhdar et des granulats de Kristel.	83
Tableau I.1: La liste des principaux composés identifiés de la vase brute.....	111
Tableau I.2: La liste des principaux composés identifiés de la vase Calcinée.....	112
Tableau I.3: Valeurs de l'indice et du coefficient d'activité de la vase calcinée.....	114
Tableau I.4: consistance normale pour pâte de ciment et pâte de vase calcinée.....	119
Tableau I.5: Formulations des coulis testés.....	121
Tableau I.6: Récapitulatif des résultats de l'écoulement au cône de Marsh et l'étalement au mini-cône.....	123
Tableau I.7: Composition du BAP de référence.....	125
Tableau I.8: Composition du MBE N°1.....	125
Tableau I.9: Calcul des surfaces développées par le gravier 8/15.....	127
Tableau I.10: Calcul des surfaces développées par le gravier 3/8.....	128
Tableau I.11: Calcul des surfaces développées par le sable de carrière.....	129
Tableau I.12: Calcul des surfaces développées par le sable de mer.....	130

Tableau I.13: Formulation du MBE établit selon l'équivalence par surfaces développées ...	131
Tableau I.14: Formulation du MBE après correction empirique	132
Tableau II.1: Compositions des quatre BAP.....	141
Tableau II.2: Caractéristiques générales des quatre BAP.....	141
Tableau II.3: Les essais de caractérisation des BAP à l'état frais.	142
Tableau II.4: récapitulatif des résultats de caractérisation à l'état frais	146

Résumé

Compte tenu des conditions relatives à la formulation des bétons autoplaçants (BAP) notamment le volume de pâte qui est très élevé 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 de dragage présentent après traitement des propriétés pouzzolaniques et donc peuvent être utilisés en tant qu'ajouts ou substituts partiels au ciment ce qui fait de la technologie des bétons autoplaçants une voie privilégiée de leur valorisation.

Cette étude vise à apporter une contribution à la valorisation de la vase traitée du barrage de Chorfa II, (Algérie) en tant que substitut minéral partiel au ciment CPA CEMI 42.5 dans la composition d'un béton autoplaçant. Il s'agit donc dans cette étude d'optimiser le pourcentage de substitution en vase calcinée pour l'élaboration d'un éco-BAP devant répondre aux exigences techniques, économiques et environnementales.

Quatre formulations ont été retenues après les étapes de formulations et de caractérisation, elles couvrent une seule classe de résistances et quatre pourcentages de substitution, les BAP en question sont : un BAP témoin à base de ciment et sans aucun pourcentage de substitution que nous appellerons le (BAP-T) et 3 BAP à base de 3 pourcentages de substitution en vase calcinée à savoir : 10, 20 et 30 %, leurs BAP correspondants sont respectivement : le BAP-V 10%, le BAP-V 20% et le BAP-V 30% .

Les BAP à base de vase ont montré des performances très comparables à celles du BAP-T voir meilleures en terme de propriétés mécaniques à long terme. Cependant, les bonnes performances mécaniques sont nécessaires mais demeurent insuffisantes pour pouvoir qualifier un BAP, en effet la durabilité est une condition primordiale pour le challenge de la valorisation, c'est pourquoi le présente étude montre qu'outre les résistances mécaniques, les différents BAP d'étude présentent des porosités très fines, De plus, la perméabilité aux gaz et la diffusion des chlorures ont été mesurées. Les résultats ont montré que jusqu'à 30% de taux de substitutions du ciment la vase calcinée affectent la perméabilité aux gaz et la diffusion du chlorure mais de façon satisfaisante, ce qui fait des BAP de cette études des BAP potentiellement durable et résistants aux différents milieux agressifs.

Mots clés : éco-BAP –Vase calcinée – Barrage de Chorfa– Résistances mécaniques – Durabilité – Porosité– Perméabilité au gaz – Diffusion des chlorures

Abstract

According to the specificities related to the formulation of self-placing concretes (SCC) and in particular to their high paste volume content and the presence of large quantities of mineral additives and substitutes, their behavior in the fresh state and the hardened state and their durability are strongly influenced by these two parameters. Treated sediments with pozzolanic properties can be used as additives or partial substitutes for cement, which makes the self-placing concrete technology a good channel for their valorization.

This study aims to contribute at the valorization of treated mud from the Chorfa II dam (Algeria) as a partial mineral substitute for CPA CEMI 42.5 cement in the composition of a self-compacting concrete. It is therefore in this study to optimize the percentage of substitution with calcined mud for the development of an eco-SCC showing good technical and economic requirements.

Four formulations were retained after the formulation and characterization steps, they cover a single class of resistances and four percentages of substitution, the SCC are: a cement-based control SCC and without any percentage of substitution which we will call the (BAP-T) and 3 SCCs based on 3 percentages of substitution with calcined mud namely: 10, 20 and 30%, their corresponding SCCs are respectively: BAP-V 10%, BAP-V 20% and BAP -V 30%.

The SCCs containing calcined mud showed very similar performances to those of the reference SCC (BAP-T) even better for long-term mechanical properties. However, the good mechanical performances are necessary but remain insufficient to be able to qualify a SCC, in fact the durability is a paramount condition for the challenge of valorization, that is why the present paper shows that besides the mechanical resistances, the various SCCs containing calcined mud, were tested for porosity, gas permeability and the diffusion of chlorides. The results showed that the substitution rates of cement by calcined mud up to 30%, affect gas permeability and chloride diffusion but in a satisfactory way, making the SCC of this study potentially durable and resistant to different aggressive media.

Key words: eco-SCC - Calcined mud - Chorfa dam - Mechanical strength - Durability - Porosity - Gas permeability - Chloride diffusion

ملخص

نظرا للخصائص المتعلقة بتركيبه الخرسانة ذاتية الوضع و خاصة حجم العجينة العالي و الكميات كبيرة من الإضافات والبدايل المعدنية المستعملة فان سلوكها في الحالة الرطبة و الحالة الصلبة و كذلك المقاومة تتأثر بقوة من قبل هذه العوامل. ويمكن استخدام الرواسب المعالجة حراريا ذات الخصائص البوزولانية كمواد أو بدائل جزئية للأسمنت، مما يجعل تكنولوجيا الخرسانة مجالا مفضلا لإعادة استخدامها.

تهدف هذه الدراسة إلى المساهمة في تميم الطمي المعالج من سد شرفا (الجزائر) كبديل معدني جزئي للأسمنت CPA 42.5 في تكوين الخرسانة ذاتية الوضع. تسعى هذه الدراسة إلى بلوغ النسبة المئوية للاستبدال الطمي المكلس من أجل تطوير خلطة الخرسانة لتلبية المتطلبات البيئية، التقنية والاقتصادية.

تم اعتماد أربعة تركيبات بعد الصياغة وخطوات التوصيف، وهي تغطي فئة واحدة من المقاومات وأربع نسب مئوية من الاستبدال، و الخرسانات المعنية هي: الخرسانة المرجعية بدون أي نسبة من الاستبدال التي سوف نسميها (BAP-T) و 3 و 10 و 20 و 30%، والمسماة على التوالي: BAP-V 10% , BAP-V 20% و BAP-V 30%.

وأظهرت الخرسانات خصائص و سلوكات مماثلة إلى حد ما تلك التي يختص بها BAP-T او حتى أفضل منها أحيانا على غرار الخصائص الميكانيكية على المدى الطويل. وان كانت الخصائص الميكانيكية الجيدة ضرورية لكنها تظل غير كافية للحكم على نوعية الخرسانة، ولهذا فان عامل الديمومة يعتبر شرط أساسي للخوض في هذا التحدي، و بالتالي فهذه المذكرة تبين أنه إلى جانب المقاومة الميكانيكية، تم قياس نفاذية الغازات وانتشار الكلوريدات. وأظهرت النتائج أن معدلات الاستبدال تصل إلى 30% من الأسمنت بالظمي المكلس يؤثر على نفاذية الغاز وانتشار الكلوريد ولكن بشكل مقبول، مما يجعل الخرسانات ذاتية الوضع المدروسة مرشحة لأن تكون لها ديمومة جيدة ومقاومة لمختلف الأوساط العدوانية.

الكلمات المفتاحية: خرسانة ذاتية الوضع - الطمي المكلس - سد شرفة - مقاومات ميكانيكية - ديمومة - مسامية - نفاذية الغاز - انتشار الكلوريدات

Introduction générale

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

En Algérie les questions liées aux dragages se rapportent principalement au coût de ces opérations, mais qui demeurent néanmoins indispensables. Même si ces opérations ne sont pas épargnées de se retrouver confrontées à un sérieux problème de stockage et d'élimination des quantités de vase draguées. Ces mêmes problèmes ont été le précurseur de la politique de valorisation qui a pour but la contribution à l'amortissement des coûts liés au dévasement et à préserver l'environnement.

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

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

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

Notons que la valorisation de ces produits dans les bétons a montré des résultats encourageants sur les performances mécaniques mais la caractérisation de la durabilité reste encore un paramètre à étudier pour une caractérisation complète qui est l'objectif principal de cette thèse.

C'est pourquoi, nous avons entamé cette étude dans un but écologique et technique en valorisant la vase après traitement thermique comme étant un matériau de construction substituable en partie au ciment. Ceci passe par une étude de l'influence du pourcentage de substitution en vase calcinée sur le comportement physico-mécanique BAP et sur les propriétés de transferts pour qualifier la durabilité des BAP étudiés.

Pour atteindre cet objectif, ce travail sera présenté sous trois parties :

La première partie de cette thèse est consacrée à l'étude bibliographique. Cette étude est composée de quatre chapitres. Dans le premier, nous présentons des généralités sur les bétons autoplaçants ainsi que quelques méthodes de formulations et de caractérisation des différentes propriétés de ce type de béton, nous introduisons dans le même chapitre le concept du mortier de béton équivalent et ses avantages dans une approche d'optimisation de formulations de BAP. Dans le deuxième chapitre nous abordons les propriétés de transfert dans les BAP ainsi que les facteurs affectant leur durabilité. Le troisième chapitre traite les additions minérales et leurs effets sur les différentes propriétés de durabilité des bétons. Les recherches publiées concernant l'influence du type d'addition minérale sur les propriétés de durabilité des BAP sont également présentés dans ce chapitre. Ensuite, dans le quatrième chapitre nous traitons les sédiments de dragage et les travaux correspondants à leur valorisation dans le domaine du génie civil en général et en tant que matériaux à caractère pouzzolanique en particulier. Nous parlons également du phénomène d'envasement affectant le barrage concerné dans ce travail, en l'occurrence, celui de Chorfa II ainsi que les possibilités de valorisation de la vase issue de ce barrage dans la technologie des BAP.

La première partie se termine par une problématique qui définit par la suite le but de cette étude et le programme expérimental adopté.

La deuxième partie décrit les matériaux utilisés pour les formulations de BAP élaborées au cours de nos travaux ainsi que le programme expérimental adopté pour les différentes étapes de cette étude. Elle est composée de deux chapitres. Dans le premier chapitre, sont présentés tous les matériaux qui ont été utilisés dans cette étude ainsi que leurs caractéristiques physico-chimiques. Le deuxième chapitre recueille toutes les méthodes d'essais constituant le programme expérimental. Les essais en question nous ont permis de caractériser au mieux la vase du barrage chorfa, de formuler des MBE et par les suites des BAP, et nous ont permis aussi de mesurer des grandeurs physico-mécaniques des BAP de cette étude (résistance à la compression, et à la ségrégation) et de définir les propriétés de transfert en l'occurrence la

perméabilité au gaz et les coefficients de diffusion des chlorures, et ce dans le but de caractériser la durabilité des BAP à base de vase calcinée et à partir desquelles nous avons étudié l'effet du pourcentage de substitution en vase sur les performances des BAP.

La troisième partie présente les résultats et les analyses de la campagne expérimentale menée sur les quatre formulations de BAP. Cette partie comporte trois chapitres. Le premier est consacré aux résultats de caractérisation de la vase notamment par rapport aux propriétés pouzzolniques, et à la formulation d'un MBE. Dans le deuxième chapitre nous présentons les résultats relatifs à la caractérisation des BAP formulés depuis une formule de référence après passage par le MBE, la caractérisation dans ce chapitre touche les propriétés d'ouvrabilité à l'état frais et les propriétés mécaniques à l'état durci et dans le troisième chapitre nous présentons les résultats relatifs aux propriétés de transferts qualifiant la durabilité des BAP de cette étude

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

Chapitre I : Les BAP: Formulation et Caractérisation

I.1 Introduction

Le béton autoplaçant (BAP) 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 forme de vibration interne ou externe) permettant d'évacuer l'air emprisonné dans le matériau. Les bétons ordinaires de consistance fluide peuvent, dans certains cas, être mis en œuvre sans vibration mais les règlements prennent en compte alors une qualité amoindrie à l'état durci [1].

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

Un BAP doit assurer le compromis entre deux propriétés tout à fait contradictoires : une haute fluidité et une haute stabilité, Ce qui distingue véritablement les BAP des bétons fluides ordinaires [2].

Les BAP présentent d'autres avantages qui justifient l'intérêt de leur utilisation:

- Élimination du besoin de vibration et les nuisances sonores;
- Réduction du temps de travail;
- Amélioration du fait de la stabilité de la matrice, de la qualité de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats ou les armatures;
- Amélioration de la qualité d'adhérence à l'interface entre un ancien béton et le BAP de réparation;

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

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

I.2 Caractérisation à l'état frais

Les bétons autoplaçants, bétons très fluides, homogènes et stables, mis en place sans apport de vibration même dans des structures complexes et fortement ferraiées, ont des caractéristiques et des comportements à l'état frais qui se différencient de ceux d'un béton ordinaire vibré. Leur ouvrabilité se décline classiquement suivant : leur mobilité en milieu non confiné, leur mobilité en milieu confiné et leur stabilité (vis-à-vis de la ségrégation et du ressuage) [3]. La caractérisation de tels bétons est donc plus complexe que celle des bétons traditionnels et implique des essais spécifiques.

Des recommandations de caractérisation ont été préconisées par l'Association Française de Génie Civil (AFGC) en 2002. D'abord provisoires, ces recommandations sont devenues in situ les essais de référence pour valider une formulation de BAP.

I.2.1 Essai d'étalement (Slump flow)

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

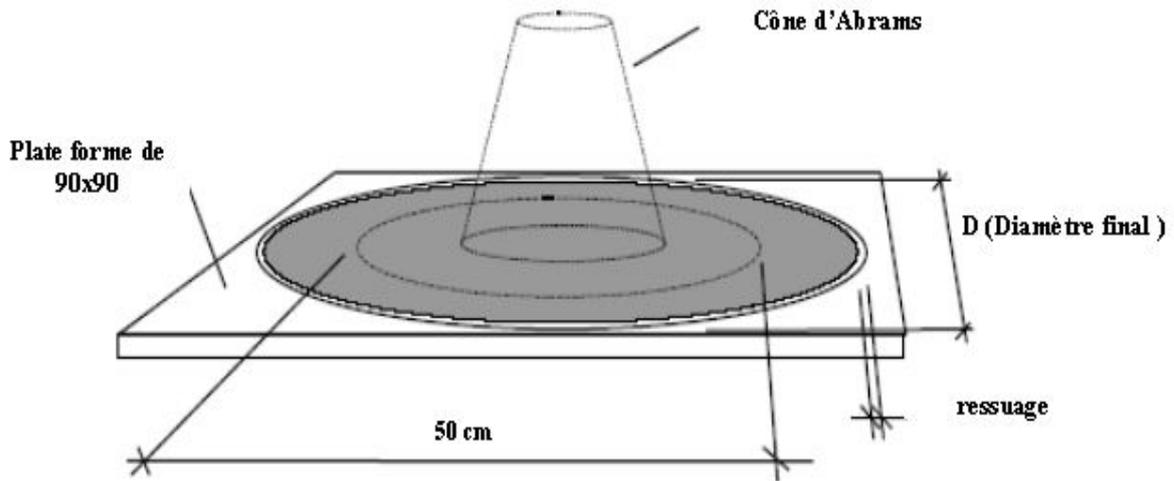


Figure I.1: Essai d'étalement au cône (slump flow) [4]

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 [1].

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

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

Cet essai consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armatures afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. Le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique comme montré en figure I.2. On caractérise donc la tendance à la ségrégation et l'enrobage d'armatures. De plus, la répartition des granulats doit être homogène.

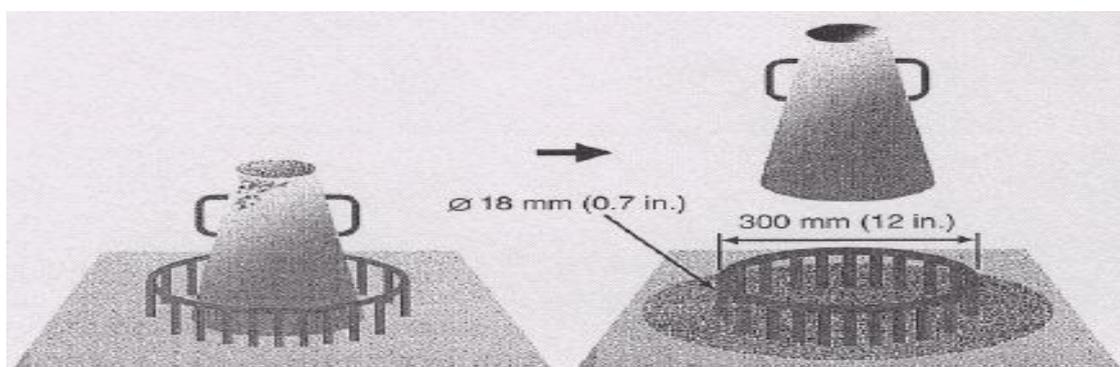


Figure I.2: J-Ring (Anneau Japonais) [5]

Le cône est placé sur une plaque plane, entourée par un anneau de 300 mm de diamètre, équipé de 16 barres HA de diamètre 16 mm (figure I-2). Une fois le cône rempli, on soulève,

ce qui laisse écouler le béton à travers les barres HA, on mesure en fin d'essai le diamètre de la galette obtenue. D'autres essais peuvent être tirés du même essai : le temps mis par le béton pour dépasser le diamètre de 500 mm T50 en secondes, et la différence d'épaisseur de la galette à l'intérieur de l'anneau et à l'extérieur de ce dernier [5].

I.2.3 Essai de la boîte en L

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

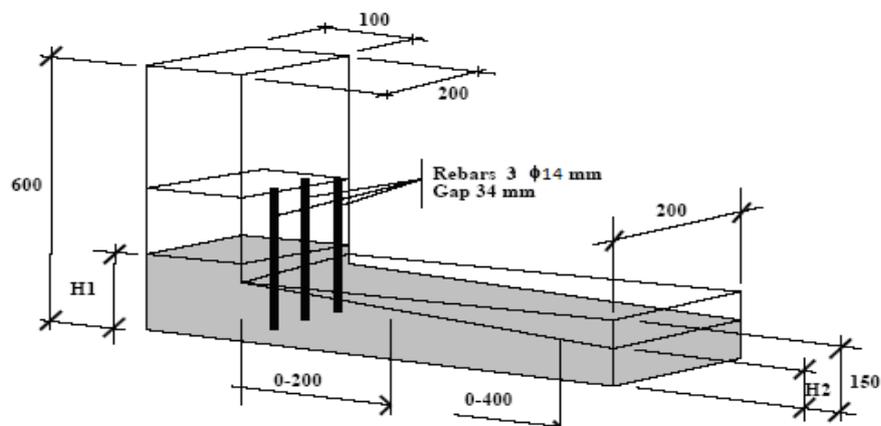


Figure I.3: Essai de la boîte en L [5]

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement on laisse le béton reposer pendant une minute. On lève la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers un ferrailage standard qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (34 mm d'espace libre entre 2 barres) [5].

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

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage ou qu'il y a blocage des granulats, c'est le signe de l'apparition de la ségrégation. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

I.2.4 Essai de stabilité au tamis

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

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

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

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

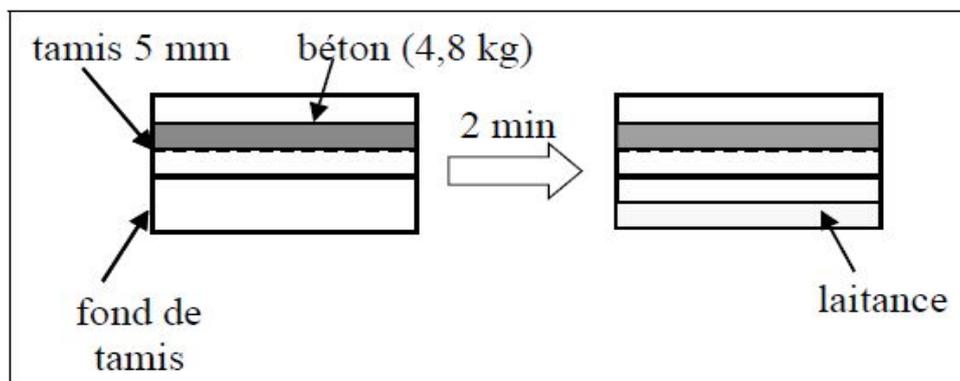


Figure I.4: l'essai de stabilité au tamis [5]

Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes [4]:

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

Selon la littérature, les BAP ayants des rapports E/C entre 0,4 et 0,5 ont un taux de ségrégation inférieur à 15% et un ressuege n'excédant pas les 3 ‰ ce qui est signe d'une stabilité correcte, tandis que 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 [8].

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

D'autres essais furent utilisés pour la caractérisation des BAP à l'état frais tels que le V-Funnel qui permet d'évaluer la mobilité du béton en milieu non confiné, et les essais du tube en U, du caisson et de la passoire permettent aussi de caractériser la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des bétons autoplaçants [5].

I.2.5 Le ressuege

Le ressuege 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 ressuege 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 ressuegé et le débit d'eau évaporée. Si ce dernier est plus faible, le phénomène de ressuege est visible, sinon, la surface du béton au lieu d'être brillante, devient mate. La quantité d'eau ressuegé sera de toute façon égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée [10].

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

D'autres propriétés du ciment influencent également le ressuage, à savoir : un fort pourcentage d'alcalis présents dans le ciment, de fortes teneurs en C_3A ou lorsque du chlorure de calcium est ajouté, minimisent considérablement le ressuage [7].

Cependant les propriétés du ciment ne sont pas les seuls paramètres pouvant affecter le ressuage du béton. D'autres facteurs doivent aussi être considérés, en particulier la proportion d'éléments très fins (plus petits que $150\mu\text{m}$), 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 $150\mu\text{m}$), le ressuage est diminué, mais les matériaux très fins doivent contenir uniquement de la poussière de concassage et non des particules d'argile [7].

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

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

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

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

I.3 Formulation des BAP

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

Deux grandes familles prévalent actuellement :

- ❖ la première concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (400 à 600 kg/m³) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions intergranulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants [19].

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

Les gammes de valeurs généralement employées sont issues des recommandations de l'AFGC tel présentées ci-dessous [3] :

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

Bien qu'il n'existe pas de méthode de formulation unique, quelques auteurs ont proposé des approches se basant sur une optimisation du mortier, une optimisation de la quantité de pâte ou une approche granulaire. Et ce en se basant sur :

- ***Le volume des 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 [2].

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

Le diamètre maximal des gravillons (D_{MAX}) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec D_{MAX} , cela conduit à diminuer le volume de gravillon [2].

• *L'emploi de superplastifiants*

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

Les superplastifiants permettent en effet de défloculer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau initialement piégée entre les floccs est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange (Figure I.5). Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place [15].

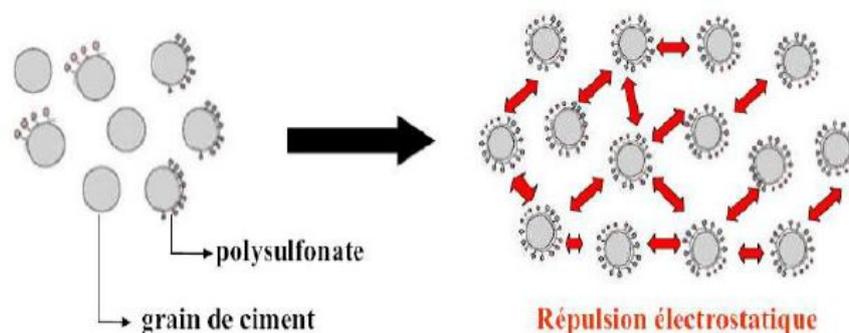


Figure I.5: Action des superplastifiants, défloculation des grains de ciment [15]

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.6).

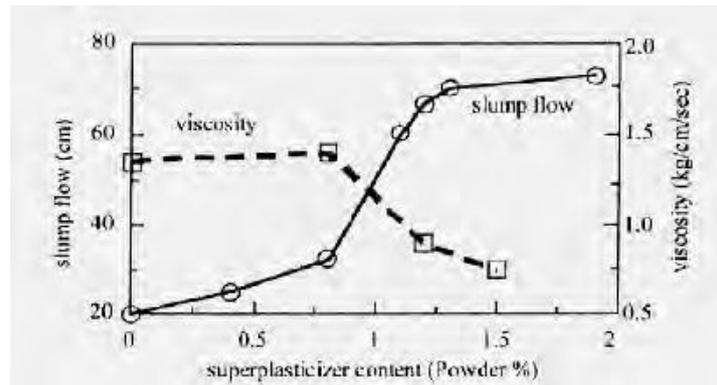


Figure I.6: Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [17].

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

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

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

La Figure I.7 montre une illustration de fillers s'insérant dans le squelette granulaire du ciment et permet de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). Cet effet se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés du béton aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

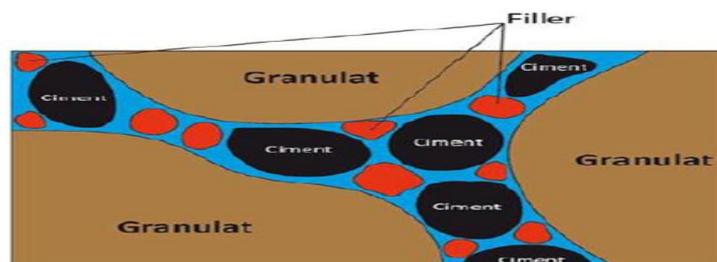


Figure I.7: Illustration de l'effet filler [18].

Les auteurs s'accordent sur le fait qu'il n'existe pas de méthode de formulation unique car les matériaux employés et leurs qualités diffèrent selon les régions ou les pays. Quelques méthodes de formulation sont cependant présentées ci-dessous.

I.3.1 Méthode basée sur l'optimisation du mortier

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

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

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

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

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

$$\Gamma = (d^2 - d_0^2) / d_0^2 \quad (1)$$

$$Rm = 10/t \quad (2)$$

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

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

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

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

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

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

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

$$Vab \text{ max} = \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g)Nga}{\left(\frac{Vab_n}{\sum Pvg_m \cdot Nga \cdot \rho_s} \right) + \left(\frac{Vab_m}{\sum Pvg_n \cdot (1-Nga) \cdot \rho_g} \right)} \quad (3)$$

avec ρ_g masse volumique des gravillons, ρ_s masse volumique du sable, Nga pourcentage de gros gravillons, Pvg_m et Pvg_n rapport entre le volume des gros granulats de classe m (respectivement des granulats fins de classe n) sur le volume total de granulats, Vab_m et Vab_n respectivement les volumes bloqués des granulats de classe m et n.

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

$$c = d_i / Dca \quad (4)$$

Avec $d_i = M_{i-1} + 3/4(M_i - M_{i-1})$ et M_i et M_{i-1} sont les dimensions des tamis encadrant la classe granulaire.

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

$$Vpd \text{ min} = Vt - Void / [(D_{ss_{min}}/D_{av}) + 1]^3 \quad (5)$$

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

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

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

$$K' = \sum K'_i = \sum (y_i / \beta_i) / (1/\epsilon - 1/\gamma_i) \quad (6)$$

Avec K'_i : indice de serrage de chacune des classes granulaires, y_i est la proportion volumique des grains de diamètre d_i , β_i est la compacité virtuelle des grains de classe i , ϵ est la compacité réelle du mélange, γ_i est la compacité virtuelle lorsque la classe i est dominante.

Vu la complexité de la formulation des BAP et leurs caractérisation, nombreux sont ceux qui s'appuient sur une formule existante en l'adaptant à leurs matériaux ou en ajoutant de nouveaux paramètres, mais même dans ce cas, les essais à l'état frais s'imposent, et dans pratiquement tous les cas, plusieurs gâchis sont testé avant de tomber sur la bonne formulation.

En effet, il a été constaté que plusieurs formules sont dérivées d'un BAP de références et ces BAP font l'objet de caractérisation, entre autres à l'état frais, ce qui a comme conséquence la consommation d'énormes quantités de matériaux, d'où l'idée du MBE

Ainsi, une approche connue sous le nom du Mortier de Béton Equivalent MBE, a pour objectif la limitation des quantités de gâchis de béton élaborés pour les essais à l'état frais. Donc le MBE est un mortier dont la formule est dérivé de celle d'un BAP de référence de sorte

que ce MBE ait un comportement à l'état frais en corrélation avec celui de son BAP de référence.

I.4 Mortier de béton équivalent

L'approche du Mortier du Béton Equivalent (MBE) a été développée au CTG (Guerville, France) pour faciliter la sélection des adjuvants lors de la formulation d'un béton. Le MBE est donc le mortier qui participe à la rhéologie, raison pour laquelle les tests se font sur mortier au lieu du béton. En fonction des essais préalables réalisés, l'expérience accumulée au cours des dernières années dans des nombreuses applications industrielles a confirmé la validité de cette méthode. Cependant, l'ensemble de ces exemples concernait des bétons d'ouvrabilité classique [54].

Pour limiter la lourdeur des études sur béton, il s'est avéré nécessaire d'utiliser une méthode d'essai rapide et capable de fournir des résultats pouvant être corrélés avec ceux qui seraient obtenus sur le béton. Le principe de calcul des MBE consiste à remplacer les graviers du béton par du sable dont la surface développée des grains est égale à celle du gravier que l'on a ôté (Figure I.8).

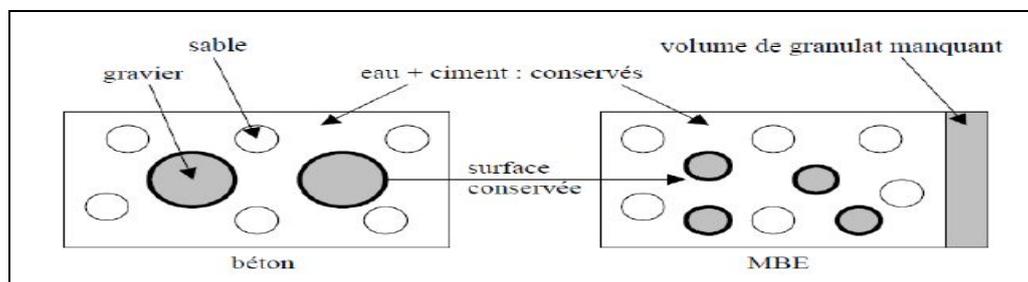


Figure I.8: Principe de formulation des MBE [54].

Ce principe est basé sur deux réflexions permettant de penser que ce sont les surfaces de contact des constituants qui importent, plutôt que leur volume :

- la première découle du fait que l'ouvrabilité d'un béton provient de la façon dont ses constituants arrivent à « glisser » les uns sur les autres pour s'écouler.
- la seconde a pour origine la chimie de la prise, les hydrates se formant plutôt au niveau des interfaces.

Il peut être obtenu expérimentalement en tamisant le béton frais au tamis de 5mm. Le calcul complet est fourni ci-dessous.

La composition du MBE peut être déduite de celle du béton de la manière suivante :

- mêmes nature et dosage en ciment ;
- mêmes natures et dosages en additions minérales ;
- même rapport E/C ;
- mêmes nature et dosage en adjuvant et même mode d'introduction ;
- utilisation du sable du béton ;
- ajout d'une quantité de sable reproduisant la même surface granulaire que les gravillons retirés.

Cette définition est valable tant que les gravillons ne contiennent pas une part significative d'éléments inférieurs à 5 mm. Dans le cas contraire, ces particules doivent être récupérées par tamisage et ajoutées au mortier [54].

Pour utiliser cette méthode, il est nécessaire de connaître les éléments d'identification des constituants et les bases de composition suivantes :

- La granulométrie de chaque classe de granulats.
- Leurs taux d'absorption d'eau.
- Leurs masses volumiques.
- Leurs teneurs en eau totales.
- La nature et le dosage en ciment (ou en liant équivalent).
- Les caractéristiques des adjuvants.
- La composition granulaire du mélange.
- Le rapport $E_{\text{efficace}}/L_{\text{équivalent}}$.

I.4.1 Corrélation entre béton et MBE

Afin de valider une formulation d'un MBE, il est indispensable de vérifier la corrélation entre les propriétés rhéologiques des différents bétons de référence et celles du MBE correspondant [64], où seule la nature du ciment, le dosage et/ou le type d'adjuvant varient. [54].

Dans une étude réalisée par Schwartzentruber et al, des formulations ont été testées en utilisant une vingtaine d'adjuvants (plastifiants, superplastifiants, hauts réducteurs d'eau) et différents types de ciment, ils ont montré qu'une corrélation linéaire pouvait être établie pour toute formule de béton entre l'affaissement mesuré au cône d'Abrams et l'étalement mesuré au mini-cône avec une valeur moyenne du coefficient de corrélation R^2 de 0,970 pour un écart type de 0,078 (Figure I.9).

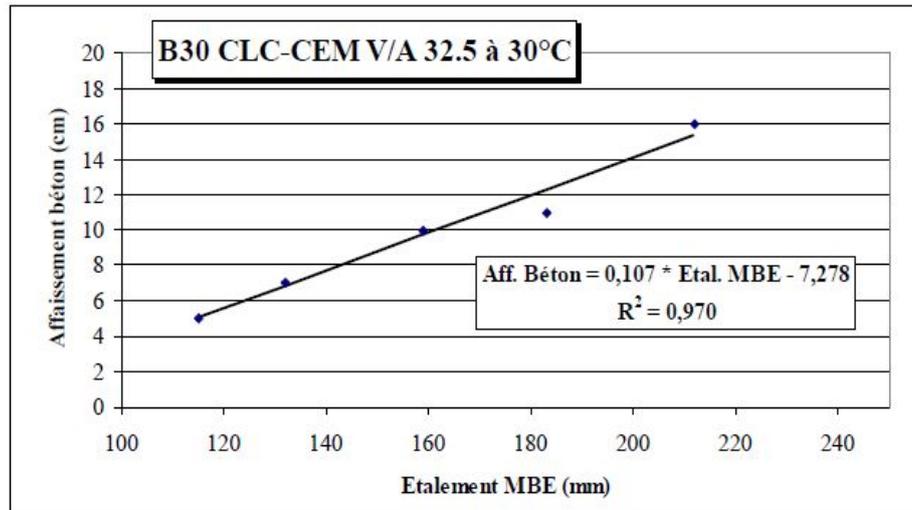


Figure I.9 : Exemple de corrélation entre l'étalement du MBE et l'affaissement du béton [54].

Une autre étude de Haifi en 2011 [52], dans laquelle il a montré que l'équation de droite de corrélation variait d'une composition à l'autre, c'est-à-dire qu'une droite n'est valable que pour un béton et son MBE correspondant. Les résultats obtenus dans son étude montrent qu'il est possible d'étendre la méthode de MBE au béton autoplaçant, et que la composition particulière des BAP ne change pas le principe de calcul des MBE. La Figure I.10 montre que le comportement rhéologique des BAP ainsi que leurs MBE est corrélable [52].

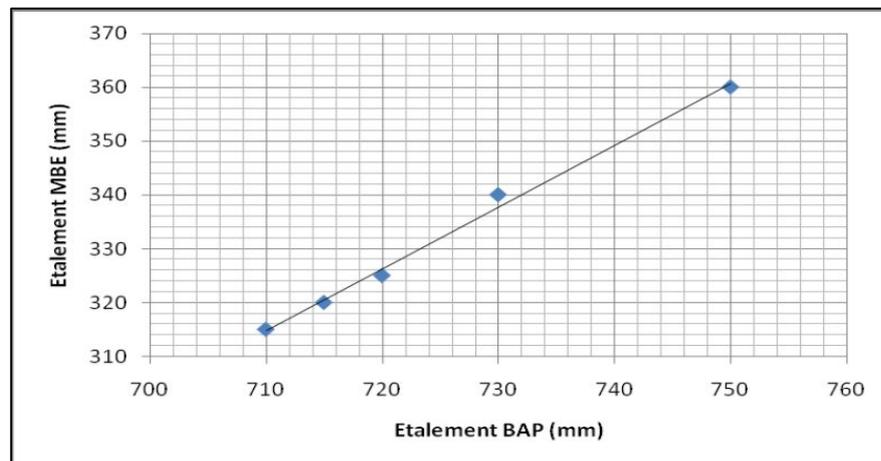


Figure I.10: Corrélation entre étalement MBE/ étalement BAP [52].

Haifi [52] a constaté que le BAP a le même comportement que celui de son mortier correspondant. Les bétons ayant subi une perte d'ouvrabilité dans le temps présentent des mortiers qui ont également perdu de l'ouvrabilité dans le temps, et pour ceux qui ont un fort maintien de rhéologie dans le temps, leurs mortiers ont présenté le même comportement.

Une fois la droite de corrélation est connue, il suffit de faire un simple essai sur MBE, soit en faisant varier le dosage en adjuvant ou bien en faisant des suivis de rhéologie dans le temps [52].

Par ailleurs certains auteurs n'ont pas trouvé une corrélation entre les propriétés du BAP et son MBE comme le montre la figure I.11. Ils ont expliqué cela par le fait que la présence des gravillons dans la phase liante ne rend pas possible l'homogénéité du milieu pendant son écoulement ce qui provoque la ségrégation des BAP donc il n'est plus possible d'évaluer correctement leur ouvrabilité [64].

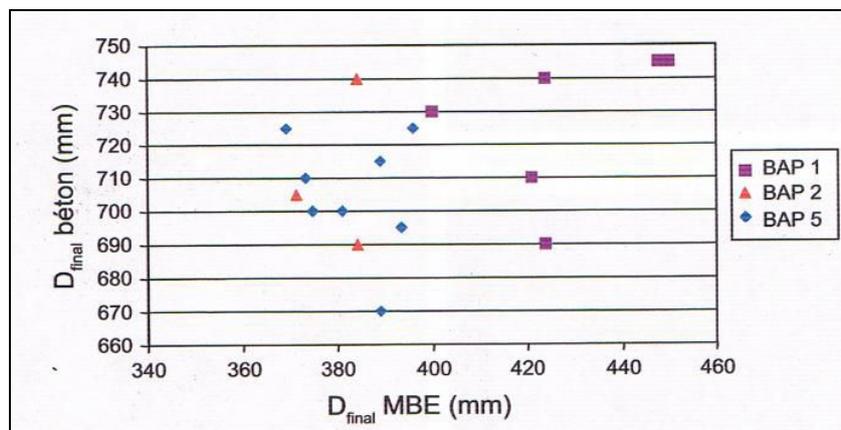


Figure I.11: Relation entre les diamètres finaux d'étalement- Béton/MBE [64].

I.4.2 Principe de surface développée par les granulats

La première étape du passage du béton de référence au MBE consiste à évaluer la surface développée par chacun des granulats dans le béton. Pour le faire, il faut d'abord admettre les hypothèses suivantes [52]:

- 1/ les particules constituant les granulats sont des sphères parfaites,
- 2/ malgré leur porosité, ces sphères sont considérées indéformables dans l'eau.
- 3/ à l'intérieur de chaque tranche granulaire, la densité de la particule moyenne est considérée indépendante de sa taille et reste égale à celle du granulat considéré.

Au niveau des granulats il convient de considérer les différents cas pouvant se présenter :

- Cas 1- Les différents gravillons présentent des masses volumiques très voisines (écart inférieur ou égal à $0,05 \text{ kg/dm}^3$)
- Cas 2- Les différents gravillons présentent des masses volumiques différentes (écart supérieur à $0,05 \text{ kg/dm}^3$).

- Cas 3- Le cas des sables.

I.4.2.1 Cas 1 :

Dans ce cas, il devient possible de calculer directement la surface développée dans le béton par les grains du mélange de tous ces gravillons. Dans ce contexte, le calcul de cette surface développée est organisé chronologiquement comme suit :

- a/- Calcul de la granulométrie du mélange des gravillons du béton.
- b/- Définition des tranches granulaires successives dans ce mélange.
- c/- Calcul de la masse de chaque tranche granulaire.
- d/- Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche.
- e/- Calcul du volume de la particule moyenne dans chaque tranche.
- f/- Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche.
- g/- Calcul du volume massique de la matrice du gravillon du mélange.
- h/- Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche granulaire.
- i/- Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire.
- j/- Calcul de la surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire.
- k/- Somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillons.

a) Granulométrie du mélange des gravillons du béton

Si on considère par exemple deux gravillons G3 et G4, qui présentent les caractéristiques suivantes :

Tableau I.1: Exemple de gravillons

Gravillon	dosage dans le béton	Masse volumique	refus au tamis t_i
G3	g_3	μ_3	R_{i3}
G4	g_4	μ_4	R_{i4}

Il est possible de déterminer la granulométrie du mélange des gravillons en calculant le refus à chacun des tamis couvrant l'ensemble des gravillons à recomposer. Le passant à chacun de ces tamis est déterminé par la formule :

$$r_i = (g_3 \cdot r_{i3} + g_4 \cdot r_{i4}) / (g_3 + g_4) \quad (7)$$

De même la masse volumique du mélange est déterminée par la relation :

$$\mu_g = (g_3 \cdot \mu_3 + g_4 \cdot \mu_4) / (g_3 + g_4) \quad (8)$$

b) Détermination de tranches successives dans le mélange :

Chaque tranche granulaire est limitée par un tamis supérieur [T_{Mi}] et par un tamis inférieur [T_{mi}]. Les refus correspondant à ces tamis sont respectivement R_{Mi} et R_{mi} (exprimés en %). Sachant que les tamis à considérer sont les suivants :

20 / 16 / 12,5 / 10 / 8 / 6,3 / 5 / 4 / 3,15 / 2,5 / 1,25 / 0,63 / 0,315 / 0,16 / 0,08 / <0,08 mm

c) Calcul de la masse de chaque tranche granulaire :

La masse M_i de chaque tranche granulaire est définie par la relation :

$$M_i = (R_{mi} - R_{Mi}) \times (g_3 + g_4) / 100 \quad (9)$$

d) Calcul du diamètre de la particule moyenne dans chaque tranche :

La particule moyenne de chaque tranche granulaire est définie comme étant la particule considérée sphérique par hypothèse présentant un diamètre (d_i) défini par la relation :

$$d_i = (T_{Mi} + T_{mi}) / 2 \quad (10)$$

Les valeurs des diamètres des particules moyennes sont données en abaque pour chaque tranche granulaire.

e) Calcul de la particule moyenne dans chaque tranche :

Le volume de chaque type de particule moyenne est donné par la relation 11 :

$$v_i = (\pi \cdot D_i^3) / 6 \quad (11)$$

Les valeurs des volumes pour chaque type de particules moyennes sont également données en abaque pour chaque tranche granulaire.

f) Calcul de la surface développée de la particule moyenne dans chaque tranche :

La surface développée pour chaque type de particule moyenne est donnée par la relation

$$S_i = \pi \cdot d_i^2 \quad (12)$$

Les valeurs des surfaces développées pour chaque type de particules moyennes sont également données pour chaque tranche granulaire

g) Calcul du volume massique de la matrice du gravillon du mélange :

Le volume massique de la matrice du gravillon du mélange est déterminé à partir de la masse volumique du mélange.

$$\omega = 1 / \mu g \quad (13)$$

h) Calcul du volume total de l'ensemble des particules dans chaque tranche :

Le volume total de l'ensemble des particules contenues dans une tranche granulaire est le produit de la masse de la tranche granulaire par le volume massique de la matrice du gravillon, ces paramètres ont été définis aux paragraphes précédents.

i) Calcul du nombre de particules moyennes dans chaque tranche granulaire :

Le nombre de particules moyennes est alors obtenu par le rapport du volume total de l'ensemble des particules de la tranche granulaire au volume unitaire de la particule moyenne, v_i et V_i sont ceux de l'étape précédente.

$$N_i = V_i / v_i \quad (14)$$

j) Calcul de la surface développée par les particules moyenne dans chaque tranche :

La surface développée par les particules moyennes dans chaque tranche granulaire est alors représentée par le produit de la surface développée de la particule moyenne par le nombre de particules moyennes :

$$S_i = N_i \cdot s_i \quad (15)$$

k) Calcul de la somme de l'ensemble des surfaces :

La somme de l'ensemble des surfaces calculées pour chaque tranche granulaire du mélange de gravillon représente la surface développée de l'ensemble des gravillons :

$$SD = \sum S_i \quad (16)$$

I.4.2.2 Cas 2 :

Dans le cas où les gravillons ont des masses volumiques différentes, le calcul doit être effectué séparément pour chaque gravillon et dans ce contexte le calcul de la surface

développée par chaque classe de gravillons du béton est fait en suivant les mêmes étapes du cas 1.

I.4.2.3 Cas 3 :

Dans le cas du béton de sable, il convient de déterminer la surface développée par le sable du béton et qui sera utilisé dans le mortier MBE. La démarche adoptée est rigoureusement identique à celle utilisée pour les gravillons même dans le cas d'emploi de deux sables de masses volumiques distinctes.

I.4.3 Caractérisation du MBE à l'état fais :

Après la détermination des surfaces développées et par conséquent la quantité de sables qui remplace les gravillons dans le MBE, une caractérisation à l'état frais du MBE s'impose afin de pouvoir valider sa formulation ou l'ajuster encore si besoin. L'outil adopté pour cette étape est le mini-cône conformément à la norme (NF EN 1961). Ce mini-cône est inspiré du cône d'Abrams et dont les dimensions lui sont proportionnelles comme le montre la figure I.12.

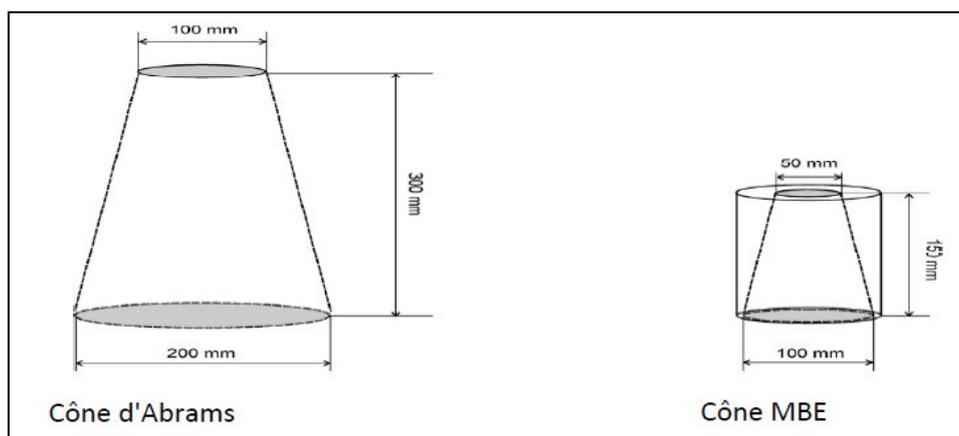


Figure I.12: Cône d'Abrams et mini-cône.

Il sert essentiellement à la détermination des diamètres d'étalement sur une plaque horizontale en fonction des paramètres de composition, ces diamètres sont mesurés après 1 minute d'étalement. Le principal avantage de cet essai consiste dans la facilité et la rapidité d'exécution puisqu'il ne nécessite qu'une faible quantité de matériaux.

I.5 Propriétés mécaniques des BAP :

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

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

Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats, ou inclusions. Les propriétés de ce mélange (module, retrait, fluage) dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait [28].

I.5.1 Résistance mécanique

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [29]. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense.

Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite [30].

Différentes données ont été publiées sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des additions minérale telles que les fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes (voir figure 1.11) [31], [32].

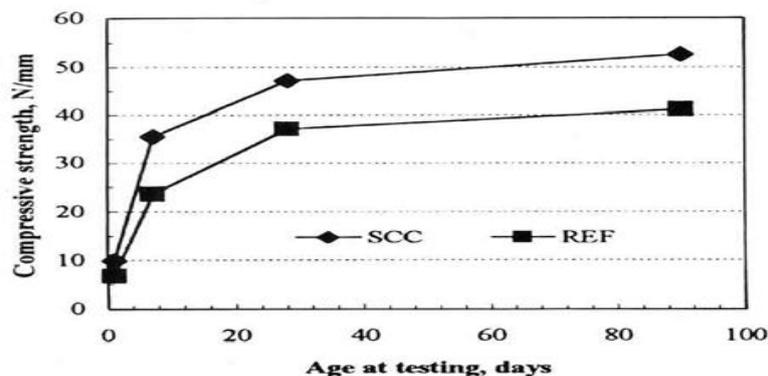


Figure I.13: Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV correspondant [32].

De plus, certains auteurs affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande [33].

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

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [34].

De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ [35].

I.5.2 Module d'élasticité (en compression) :

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

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

A partir d'un calcul prenant en compte le volume respectif des différentes phases (pâte, granulats), les modules résultants peuvent être comparés aux prévisions réglementaires [27] comme l'indique la figure I.14.

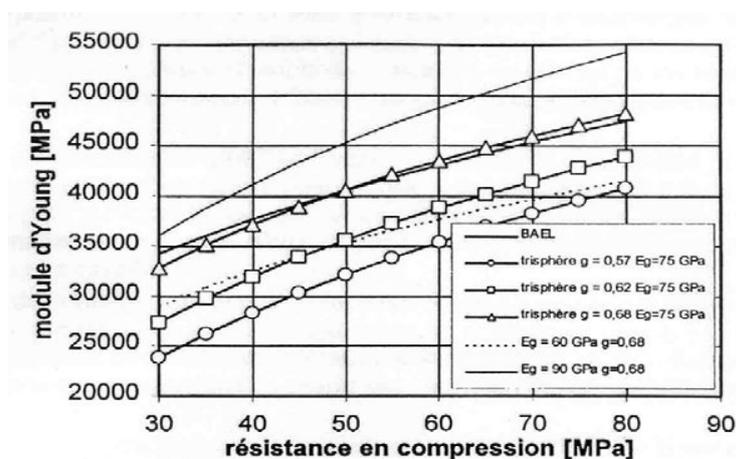


Figure I.14: Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [27].

Ainsi, pour des caractéristiques représentatives des bétons courants, à savoir un module E_g de 75000 MPa et une proportion de granulats (g) de 68%, les résultats sont très proches des valeurs prédites par le BAEL. Par contre, lorsque les proportions granulaires sont plus faibles (57% par exemple), ce qui est le cas pour les BAP, le module calculé est plus faible de 7000 à 9000 MPa que celui prévu par le règlement, soit une diminution relative de 15 à 30%. Ces écarts deviennent deux fois moins importants pour une proportion moyenne de granulats (g = 62%) puisque les modules sont inférieurs aux prévisions du règlement de 7 à 20% [28].

I.5.3 Le Retrait (état frais, état durci)

Lors du séchage d'un matériau à matrice cimentaire, le départ de l'eau libre est à l'origine de divers phénomènes. Il provoque une contraction ou un retrait (de dessiccation) de la matrice cimentaire. Cette contraction ne peut être libre à cause de la présence des inclusions rigides allant des grains de ciment non hydraté aux plus gros granulats, qui l'empêchent. De plus, la lenteur du séchage, du fait de la faible perméabilité des matériaux, fait apparaître de forts gradients hydriques causant ainsi des retraits différentiels. Les inclusions rigides et les gradients hydriques vont conduire à une microfissuration dès que la résistance à la traction du matériau est excédée. Afin d'étudier uniquement l'interaction entre ces différents effets dus à la dessiccation et le comportement mécanique à court (sollicitations quasi instantanées) et à long terme, le(s) matériau(x) doit(vent) être de maturité élevée, c'est à dire que les effets différés autres que le séchage sont négligeables [45].

Le retrait du béton peut être défini comme la déformation d'un élément de béton libre de toute sollicitation mécanique extérieure dans une ambiance thermodynamique constante, ainsi on distingue le retrait dans une ambiance sèche et le gonflement dans une ambiance saturée. La prédiction de cette déformation est d'une très grande importance pour l'étude de la durabilité et de l'aptitude au fonctionnement à long terme des structures en béton (ponts, ouvrages hydrauliques, etc.). En effet, elles peuvent être à l'origine de la fissuration, de pertes de précontrainte, d'une redistribution des contraintes, et même, plus rarement, de la ruine de l'ouvrage [45]. Cette variation dimensionnelle dépend de plusieurs paramètres tels que la composition du béton, la qualité de ses constituants, la taille des éléments ainsi que les conditions extérieures de conservation [46].

D'après la littérature, on distingue 5 principaux types de retrait, à savoir :

I.5.3.1 *Le retrait de dessiccation :*

Le retrait de dessiccation est lié au séchage qui se manifeste avant, pendant et après la prise du béton. Dans des conditions courantes, il est de l'ordre de 1 mm/m. La fissuration qui en résulte est dû à la dépression capillaire qui se produit lorsque des ménisques d'eau se forment dans les pores capillaires du béton frais. Ce retrait, qui est donc consécutif à l'évaporation de l'eau, peut se manifester quelques minutes après la mise en œuvre du béton, et se poursuivre quelques semaines après. Il est piloté par la cinétique de dessiccation [49].

I.5.3.2 *Le retrait de plastique :*

D'origine exogène, il peut se développer à la surface du béton, dès la fin de sa mise en place, par dessiccation et il se manifeste alors avant et pendant la prise initiale du béton. Il est causé par une évaporation trop rapide de l'eau en surface qui ne peut pas être compensée par un apport d'eau provenant de la masse de béton sous la surface. Il provoque une forte contraction de la pâte qui fait fissurer la surface externe. Le retrait plastique est généralement associé à une technique de cure mal adaptée aux conditions climatiques [48].

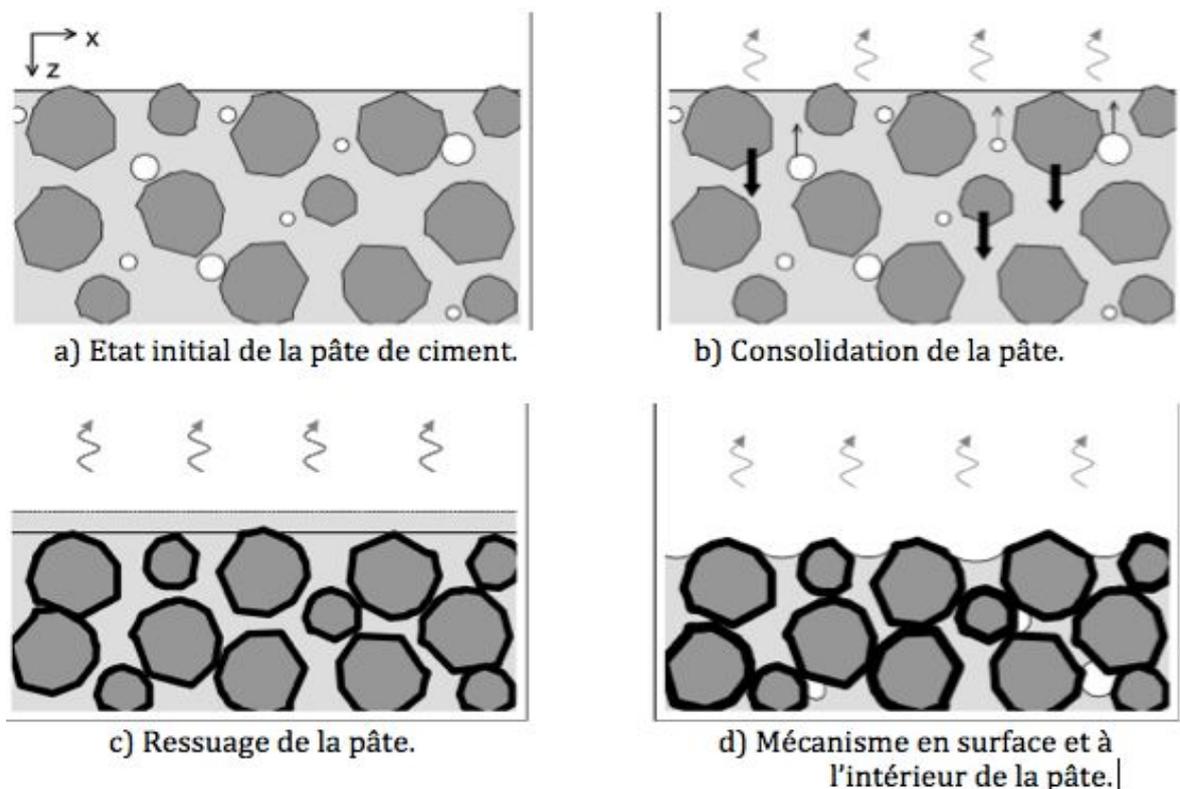


Figure I.15: Schématisation des mécanismes du retrait plastique d'une pâte de ciment.

I.5.3.3 Le retrait thermique :

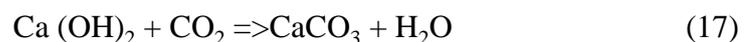
Lors du processus d'hydratation, différentes réactions chimiques se développent et entraînent alors un dégagement de chaleur, un gain de résistance et une contraction de volume solide causée par le refroidissement du béton vers la température ambiante. Cette contraction thermique est appelée retrait thermique [15] [48].

I.5.3.4 Le retrait endogène (dit d'auto-dessiccation) :

Lier à la contraction du béton en cours d'hydratation et protégé de tout échange d'eau avec le milieu environnant. Il provient en fait d'un phénomène d'auto-dessiccation de la pâte de ciment consécutif à la contraction Le Chatelier (le volume des hydrates formés est plus petit que le volume de l'eau et du ciment anhydre initial). Le phénomène conduisant à la contraction est dû à des forces de traction capillaires internes, similaires à celles responsables du retrait plastique. Ce dernier type de retrait concerne plus particulièrement les bétons à hautes performances (BHP) ou à très hautes performances (BTHP). Il est généralement négligeable pour les bétons ordinaires [49].

I.5.3.5 Le retrait de carbonatation :

Le retrait de carbonatation est un type de retrait spécial causé par une réaction chimique. Quand le béton durci est exposé à l'air, le gaz carbonique présent dans l'air pénètre à l'intérieur du béton et réagit avec l'hydroxyde de calcium (portlandite), libéré par l'hydratation, pour former du carbonate de calcium :



La profondeur de carbonatation est très faible dans un béton d'une qualité satisfaisante, dont la porosité n'est pas très élevée. À cause de cela, le retrait de carbonatation est souvent considéré comme insignifiant et il n'est pas pris en considération dans la pratique.

Les quatre premiers types de retrait peuvent se cumuler à l'échelle d'un même béton (on parle ainsi du retrait total comme la somme des différents retraits). Enfin, le retrait d'auto-dessiccation et le retrait thermique intéressent la masse du béton, alors que les deux autres types de retrait concernent la périphérie des éléments en béton [48].

Selon les résultats d'une étude sur le retrait chimique au très jeune âge et l'influence des inclusions granulaires réalisée par Bouasker et al montrent que le rapport eau/ciment et le type

de granulats n'ont pas d'effet significatif sur le retrait chimique des mortiers. Depuis la fin du malaxage et jusqu'à quelques heures d'hydratation, la taille des granulats et la concentration granulaire n'influence pas non plus la cinétique et l'amplitude du retrait chimique des mortiers, égal à celui de la pâte de ciment pure. Au cours de cette phase, on peut supposer l'interaction pâte-granulats comme négligeable. Au-delà, l'effet de la surface développée des grains est significatif. En effet, on remarque que le retrait chimique est une fonction croissante de la surface développée par les granulats. Ce phénomène peut s'expliquer par un meilleur malaxage et une destruction des amas de grains de ciment en présence de granulats [50].

Les granulats n'ont donc d'effet ni sur l'hydratation ni sur le retrait chimique pendant les premières heures. Après la prise, ils accélèrent légèrement l'hydratation (effet cinétique) mais ne modifient pas le coefficient de retrait liant l'évolution du retrait chimique à celle du degré d'hydratation [50].

L'étude des déformations de retrait d'un mortier contenant différentes additions minérales réalisé par Itim et al a montré que la présence des ajouts minéraux à des taux convenables fait diminuer le retrait de dessiccation, cela est le résultat de leur contribution à l'amélioration de la microstructure. Le calcaire engendre un retrait semblable à celui du ciment ordinaire et le laitier fait diminuer le retrait final proportionnellement aux taux de substitution. Par contre, de son côté, la pouzzolane naturelle fait augmenter le retrait à 10% de substitution et une fois ce taux dépassé sa valeur est réduite. Les pertes d'eau sont plus significatives au jeune âge pour le calcaire et le laitier. Ceci montre la nécessité d'une cure prolongée pour les éprouvettes de laitier et de calcaire et un peu moins pour celles à la pouzzolane pour éviter toute perte d'eau qui peut entraîner l'affaiblissement de l'hydratation [46].

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini les BAP et les méthodes de leur formulation et caractérisation. Cependant, leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière. Parmi les propriétés des BAP qui ont été abordées dans ce chapitre, nous soulignons trois de leurs importantes paramètres à savoir : le volume limité de gravillon, le dosage en superplastifiants et l'utilisation d'une quantité importante d'addition ($\emptyset < 80 \mu\text{m}$).

Vu l'important volume des fines dans les formulations de BAP, il semble nécessaire de donner une perspective particulière à ce sujet. Par conséquent, dans notre programme de

recherche, nous avons tracé comme objectif l'étude de l'influence du pourcentage de substitution vase calcinée en tant que pouzzolane synthèse sur les propriétés mécaniques, de retrait et d'ouvrabilité des BAP et leur durabilité.

Les formulations de BAP doivent obéir à un certain nombre d'exigences, c'est pourquoi les essais de validation de formulations à l'état frais et l'état durci sont incontournables ce qui nécessite des quantités considérables de matériaux au labo. Pour pallier à ce problème, le recours à l'utilisation du concept du MBE semble intéressant.

Chapitre II : Durabilité et Propriétés de Transfert

II.1 Introduction

Depuis des dizaines d'années, la durabilité du béton est le thème principal de la technologie des bétons. De nombreuses influences de différents genres peuvent avoir des effets négatifs sur la durabilité. Afin d'assurer une haute et persistante durabilité, le concept d'un béton étanche est au cœur de la discussion. Un béton compact résistant aux influences néfastes doit par conséquent présenter une très faible porosité et une bonne résistance à la formation de fissures. La formation de fissures dans un ouvrage en béton est directement liée aux paramètres suivants:

- Charges d'exploitation
- Environnement climatiques
- Mises au point constructives
- Choix des matériaux (composition du béton)

En effet, 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.

II.2 La Durabilité des BAP

La durabilité peut être définie comme la résistance du béton aux agressions chimiques ou physiques, en maintenant son comportement et ses performances dans de bonnes conditions de service prévus pour l'ouvrage [53].

Généralement, les agressions chimiques sur le béton affectent d'abord la pâte du ciment. Le béton, le mortier ainsi que la pâte de ciment hydraté, peuvent être considérés comme des

matériaux multiphasiques composés d'une phase solide (squelette poreux comme les granulats et hydrates) et d'une phase liquide (solution interstitielle) et d'une phase gazeuse (air sec, vapeur d'eau, CO₂ ...) se trouvant à l'intérieure du matériau solide [53].

Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons autoplaçants, la perméabilité (aux gaz), la migration des ions chlorure, 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.

II.3 Propriétés de transfert

Les propriétés de transport dans le béton sont développées par l'excès d'eau dans le béton pendant le processus de durcissement. Une fois que le ciment dépense l'eau dont il a besoin pour s'hydrater et durcir, l'excès d'eau s'échappe et laisse derrière un système de capillaires minces et pores internes. Ces capillaires et pores permettent des substances telles que les gaz, les liquides et ions à pénétrer dans le béton qui, avec la présence de chlorure ou de sulfate, peut être dangereux pour l'intégrité structurale du béton. Les chlorures sont potentiellement dangereux à cause de leur impact corrosif sur les aciers du béton. D'autres substances peuvent causer problèmes liés à la durabilité tels que l'attaque au sulfate et la réactivité de la silice alcaline. Les propriétés de transport sont un indice approprié de la durabilité du béton car les deux considèrent la pénétration de substances dangereuses dans le béton.

II.3.1 La porosité

La porosité d'un matériau caractérise l'importance des vides qu'il contient. Elle est défini par le rapport entre le volume des pores V_p , et le volume total V_t . La porosité comprend tous les pores du matériau, elle est généralement supérieure à 10% pour un béton courant. Les pores forment des réseaux de vides plus ou moins liés. La porosité dépend de plusieurs facteurs: le rapport E/C (Eau sur Ciment), la compacité du béton frais, le volume pâte/granulats et la porosité des granulats. Généralement, on distingue trois types de pores :

- **Les pores interconnectés** : ils forment un espace connecté dans le milieu poreux et participent au transport de matière à travers le matériau.

➤ *Les pores aveugles ou bras morts* : ils sont interconnectés d'un seul côté et peuvent être accessibles à un fluide extérieur mais ils ne participent pas au transport de matière.

➤ *Les pores isolés* : ils ne communiquent pas avec le milieu extérieur.

La porosité ouverte, aussi appelée « porosité accessible », rassemble deux des catégories de pores précités (pores interconnectés et aveugles). Dans le cas du béton, on néglige la proportion volumique de pores isolés, la porosité accessible est considérée comme égale à la porosité totale.

La distribution des pores dans un béton couvre un large spectre de taille de pores : capillaires, internes aux hydrates, bulles d'air et fissures. Dans le cas du béton, deux familles de taille de pores sont à considérer :

❖ *les pores capillaires,*

❖ *les pores internes aux hydrates.*

Les pores capillaires peuvent être détectés par porosimétrie au mercure. Ils représentent les espaces intergranulaires et sont directement liés au rapport E/C du mélange de la pâte de ciment. Les pores internes aux hydrates, inter et intra-cristallites (ou espaces inter-feuillets) sont nettement plus petits que les précédents, et sont intrinsèques à la formation des hydrates et indépendants du rapport E/C. Cette porosité peut être observée à l'aide de l'adsorption gazeuse.

Un autre paramètre joue un rôle important dans la porosité à savoir : l'interface pâte-granulats qui caractérise la liaison qui s'établit au cours de l'hydratation entre la matrice cimentaire et les granulats qu'elle enrobe, se traduit par une zone de pâte particulière appelée l'auréole de transition [76] [77].

Cette interface présente une porosité plus importante que le reste de la matrice. Les pores, plus grossiers dans cette zone, deviennent un réseau de cheminement privilégié pour les transferts. Salih [78], a montré que la perméabilité de l'interface est plus grande que celle de la matrice. L'épaisseur de cette zone augmente avec la taille du granulat et le rapport E/C, mais reste dans tous les cas inférieure à 50 μm [78].

Cette spécificité des matériaux cimentaires est causée par un excès local d'eau : un film liquide se forme sur la surface du granulat au moment du gâchage, modifiant la liaison au

cours de l'hydratation entre la matrice cimentaire et le granulat. Cette liaison dépend de la concentration en ciment, des conditions de conservation et de la nature des granulats.

II.3.2 La Perméabilité

La perméabilité est définie comme la capacité d'un milieu poreux à être traversé par des fluides sous gradient de pression. La perméabilité est indépendante des propriétés du fluide saturant contrairement à la conductivité hydraulique.

La perméabilité du béton est fortement influencée par les paramètres du milieu poreux comme la porosité, la tortuosité et la connectivité [79] [80]. En effet, plus la porosité augmente ou est connectée, plus la résistance au flux est faible ; moins la tortuosité est prononcée et plus la perméabilité est grande. La perméabilité d'un béton dépend également fortement de ses constituants, la nature des granulats, du sable, des additifs etc.

En 1856, Darcy a proposé une loi d'écoulement des fluides dans un milieu poreux avec les hypothèses suivantes cités par Dullien.F et Al [80] :

- les forces d'écoulement sont dues à la viscosité (les forces d'inertie sont négligées)
- le milieu poreux est totalement saturé par une seule phase fluide ;
- les écoulements du fluide sont supposés laminaires ;
- le fluide n'a pas d'interaction physico-chimique avec le matériau.

Dans la dernière hypothèse, le fluide est supposé sans interaction avec le milieu poreux, mais ce n'est pas le cas de l'eau dans les matériaux cimentaires. Loosveldt a montré qu'il existait une bonne corrélation entre la perméabilité au gaz (Argon) et la perméabilité à l'éthanol corrigée par l'effet de Klinkenberg sur mortier séché à 60 °C jusqu'à stabilisation de la masse. Cependant la perméabilité à l'eau présente au moins un ordre de grandeur de moins que la perméabilité à l'éthanol [82]. La perméabilité intrinsèque K (m^2) est définie selon cette même loi de Darcy. Cependant, cette dernière ne prend en compte que la viscosité dynamique et le gradient de pression du fluide de percolation, c'est-à-dire que la viscosité du fluide gouverne l'écoulement. La figure II.1 montre un exemple du profil des vitesses d'un fluide visqueux dans un tube capillaire.

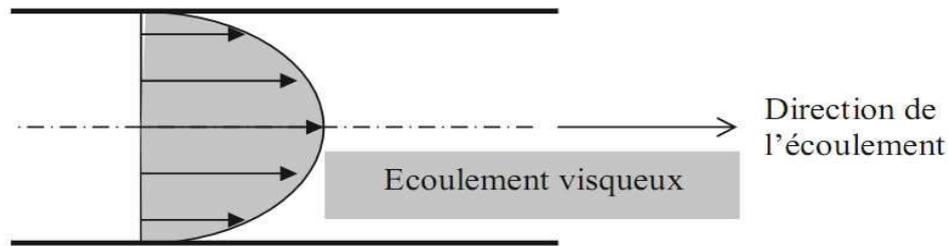


Figure II.1: Profil des vitesses d'un fluide visqueux dans un tube capillaire [83].

Pour un écoulement visqueux, les vitesses sont nulles aux parois du tube capillaire. Ceci est une condition nécessaire pour l'application de la loi de Darcy. Cette condition est satisfaite lorsque le fluide de percolation est un liquide. Lorsque le fluide injecté est un gaz compressible, à l'écoulement visqueux peut s'ajouter un autre écoulement : un écoulement de glissement. L'écoulement par glissement est une part de l'écoulement total du gaz et est lié au phénomène de non adhérence du gaz au contact de la paroi du capillaire. En effet, la vitesse aux parois des pores n'est plus nulle du fait de la collision des molécules de gaz avec les parois des pores. Le profil de la vitesse du gaz des écoulements visqueux et par glissement dans un tube capillaire est représenté sur la figure II. 2.

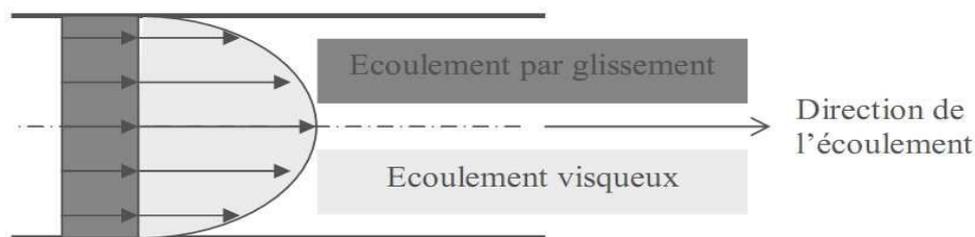


Figure II.2: Profil des vitesses d'un gaz dans un tube capillaire [83].

Lorsque le diamètre des pores est du même ordre de grandeur que le libre parcours moyen de gaz, un écoulement de glissement apparaît (appelé effet Klinkenberg [84]). Cet effet s'accompagne d'une augmentation de la perméabilité. Cette augmentation est également observable lorsque la pression moyenne d'injection du gaz d'essai est faible. En effet, plus la pression moyenne est faible, plus le libre parcours moyen augmente, c'est-à-dire qu'il faut augmenter la pression du gaz afin de diminuer les phénomènes de glissement. Si la pression du gaz tendait vers l'infini, l'écoulement par glissement serait entièrement éliminé.

Ainsi, la perméabilité mesurée au gaz est apparente et une correction de celle-ci est nécessaire pour la détermination de la perméabilité intrinsèque. Plusieurs méthodes existent pour calculer la perméabilité intrinsèque, telle que la méthode de Klinkenberg, de Carman,

etc. [85] [86]. La méthode de Klinkenberg [84] la plus utilisée [83] [87] [88] [89], est traduite par l'équation (17), qui permet de déterminer la perméabilité intrinsèque K_i (m^2), uniquement relative aux écoulements visqueux, à partir de plusieurs mesures de perméabilité apparente K_a à différentes pressions. Nous pouvons observer que les écarts entre la perméabilité intrinsèque et la perméabilité apparente sont de plus en plus faibles lorsque la pression augmente, Klinkenberg établit une évaluation du coefficient de perméabilité intrinsèque K_i , en fonction de la perméabilité apparente K_a et l'inverse de la pression moyenne (équation 17).

$$K_a = K_i \left(1 + \frac{\beta}{P_m} \right) \quad (17)$$

Avec : P_m : pression moyenne (MPa) et β : coefficient de Klinkenberg.

$$P_m = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (18)$$

Avec : P_1 : la pression du fluide à l'entrée et P_2 : la pression du fluide à la sortie.

La méthode de détermination de K_i consiste à tracer la meilleure droite à partir des différentes mesures de perméabilité apparente effectuées pour des pressions d'injection différentes selon l'inverse de la pression moyenne comme illustré dans l'exemple de la figure II.3.

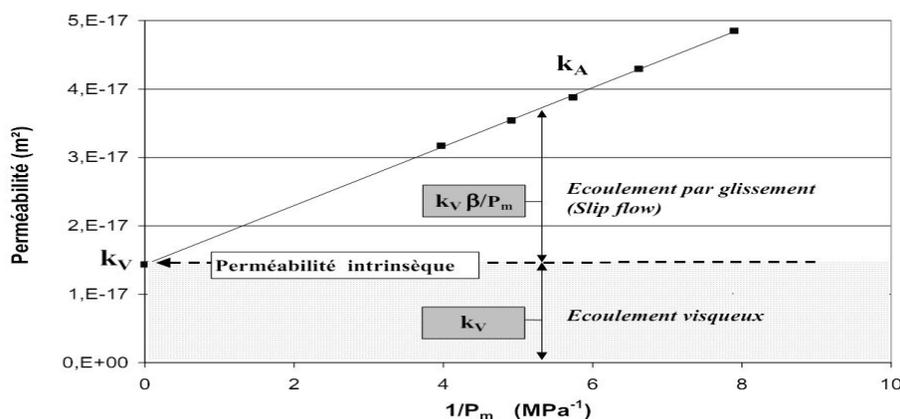


Figure II.3: Résultats obtenus à partir de mesures expérimentales d'un béton ordinaire [89]

Ceci indique que la perméabilité intrinsèque K_i est liée au seul écoulement visqueux. Sa valeur dépend aussi du degré de saturation du matériau lors des essais, on l'appelle alors la perméabilité effective K_{eff} .

II.3.3 La diffusion

La diffusion désigne le processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire. S'il existe des différences de concentration entre deux points du milieu, ce phénomène engendre un transport global du constituant considéré, orienté de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée, [91]. Les transports par diffusion peuvent intervenir sous deux formes : en phase liquide ou en phase gazeuse.

La diffusion en phase liquide concerne notamment la diffusion des chlorures dans le béton. Deux paramètres sont essentiels pour décrire ce phénomène. Le premier est le coefficient de diffusion des chlorures qui caractérise leur mobilité. Il est d'une grande importance pour estimer le taux de pénétration des chlorures. Le deuxième paramètre est relatif aux isothermes de fixation des chlorures dans le cas de matériaux cimentaires.

La diffusion en phase gazeuse concerne notamment la dessiccation d'un béton déjà partiellement sec (transfert de vapeur d'eau), ainsi que la pénétration de gaz agressifs pour le béton ou pour ses armatures tels que le dioxyde de carbone ou l'oxygène [91]. À noter que, le transport de gaz dans les bétons ne se produit généralement pas par écoulement (sous l'effet de différence de pression), mais plutôt par diffusion dans l'air contenu dans les pores ou les fissures du matériau. [91].

Les ions chlorure sont transportés à travers la matrice en béton via plusieurs voies. Ceux-ci comprennent la diffusion, l'absorption capillaire et la pression hydrostatique. L'absorption a lieu pendant les cycles de mouillage et de séchage. Au cours de ces cycles, les chlorures sont absorbés par l'aspiration de l'eau contenant les chlorures dans les pores du béton. Les ions chlorures sont également introduits par pression hydrostatique, ou par l'eau stagnante, ce qui provoque la propagation des ions chlorure à travers la matrice. La diffusion est donc le mécanisme capable de porter des chlorures jusqu'aux armatures du béton, accélérant ainsi la corrosion des barres d'armatures.

II.3.3.1 Description phénoménologique de la pénétration des chlorures

La pénétration des chlorures nécessite la présence d'une phase liquide. En milieu saturé, ou partiellement saturé mais avec interconnexion de la phase liquide du béton poreux, les ions chlorures pénètrent dans le béton par diffusion. La diffusion résulte de l'agitation aléatoire d'espèces soumises à un gradient de potentiel chimique. Pour les parements soumis à des cycles d'humidification et de séchage (zone de marnage ou sels de déverglaçage), les chlorures pénètrent tout d'abord par absorption capillaire et migrent avec la phase liquide par convection dans la zone concernée. Leur progression se fait ensuite par diffusion dans la partie à saturation constante.

II.3.3.2 Détermination du coefficient de diffusion sous champ électrique

Le processus de diffusion reste un processus lent pour lequel l'essai de diffusion et l'essai d'immersion ne sont pas satisfaisants surtout pour un béton au jeune âge qui voit sa microstructure évoluer pendant la durée de l'essai. Des essais de migrations ont été développés afin d'accélérer le transport des chlorures. Il s'agit d'appliquer une différence de potentiel de part et d'autre de l'échantillon de béton par l'intermédiaire d'électrodes. Sous l'influence du champ électrique créé, le mouvement des chlorures, ainsi que celui des autres espèces ioniques, est accéléré vers l'électrode de signe opposé.

II.3.3.3 Ions chlore dans les matériaux cimentaires

Les chlorures dans un matériau cimentaire peuvent se trouver sous plusieurs formes : libres en solution, physiquement liés à la matrice, chimiquement liés et éventuellement cristallisés.

a) Chlorures libres

Ces ions sont capables de se déplacer dans la phase liquide sous gradient de concentration, tout comme la vapeur dans l'air. Leur mouvement dans un milieu poreux non saturé sera intimement lié à celui de la phase liquide. En particulier, la disparition de la continuité de la phase liquide (annulation de la perméabilité au liquide), sera également un seuil de transfert pour les ions qui resteront prisonniers dans les îlots. Les chlorures libres sont considérés comme les principaux acteurs dans les processus de corrosion des armatures.

b) Chlorures liés

Les chlorures se fixent à la matrice cimentaire soit physiquement par adsorption sur les gels de C-S-H soit chimiquement par réaction chimique avec les phases aluminates. Plusieurs facteurs peuvent influencer cette fixation [92] [93] [94] :

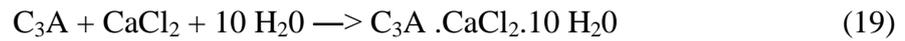
- La concentration en chlorures libres : plus la concentration en chlorures dans la solution des pores est élevée, plus la fixation des chlorures est importante.
- La quantité de liant : la quantité de chlorures fixée est fonction de la quantité de liant.
- La surface spécifique : plus la surface spécifique du ciment est grande, plus le nombre de sites de fixation est grand.
- La température : l'élévation en température tend à diminuer la fixation des chlorures.
- La présence d'autres espèces ioniques : particulièrement les hydroxydes et les alcalins. L'augmentation du pH diminue la fixation des chlorures. De plus, la quantité de chlorures fixée est différente selon le type des cations associés aux chlorures.

II.3.3.4 Fixation des chlorures dans les gels de C-S-H

Les chlorures se fixent sur les gels de C-S-H par adsorption et peuvent être piégés au sein des feuillettes de cette phase. L'adsorption possédant une faible énergie d'activation et une faible chaleur de réaction, elle est très facilement réversible. Les chlorures intercalés dans les feuillettes sont probablement beaucoup plus fermement liés.

II.3.3.5 Fixation des chlorures par réaction avec les aluminates

Les chlorures dans une matrice cimentaire peuvent réagir avec les aluminates de calcium de la pâte de ciment durcie [92]. D'après certains chercheurs [94] [95] [96], la fixation chimique des ions chlore dépend des caractéristiques du ciment utilisé, principalement de la proportion d'aluminate C_3A et d'alumino-ferrite C_4AF présents dans le clinker. Le pourcentage de C_3A et C_4AF peut être un facteur important qui influe sur la fixation chimique des chlorures : le C_3A réagit avec les chlorures pour produire en général le sel de Friedel (Equation 19) ; le C_4AF réagit avec les chlorures en donnant un chloro-ferrite, analogue au sel de Friedel (Equation 20). Cette hypothèse est claire dans le cas où les ions chlore sont présents dans les matériaux au moment du coulage (chlorures internes) du fait qu'ils peuvent réagir rapidement avec le C_3A et le C_4AF [94] [96]. Cependant, dans le cas où les ions chlore pénètrent ultérieurement à l'intérieur du béton (chlorures externes), il existe des contradictions [97] [98] dans la littérature.



II.3.3.6 Chlorures cristallisés

Localement dans le milieu poreux, la concentration en chlorures de la solution interstitielle peut atteindre la limite de solubilité de cristaux tels que NaCl ou CaCl₂. Il y a donc possibilité de précipitation de sels dans le réseau. On peut considérer ces chlorures comme « fixes », à condition qu'on puisse effectivement les considérer comme immobiles et liés au squelette solide.

II.4 Conclusion

Les propriétés de transport sont définies par les structures des pores de la pâte et le volume de la pâte. La perméabilité et la diffusivité dépendent de la porosité et à la taille des vides dans le béton. La capacité de liaison de la pâte de ciment est définie par la diffusivité. Pour réduire la perméabilité et la diffusivité dans le béton, une réduction des volumes, des dimensions et de la connexion des pores est nécessaire. Une réduction des caractéristiques des pores peut être obtenue en sélectionnant des agrégats ou des propriétés de pâte appropriés qui améliorent la zone de transition du béton. La réduction des matériaux eau-ciment ou la réduction de la teneur en eau peuvent conduire à une meilleure formation des pores.

La structure des pores est renforcée en durcissant adéquatement le béton et en utilisant les additions minérales. Un matériau cimentaire supplémentaire améliore la structure des pores avec un meilleur tassement de la structure des pores qui conduit à une moindre connectivité entre les pores.

Chapitre III : Les Additions Minérales

III.1 Introduction

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

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

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

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

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

III.2 Les additions minérales dans les BAP

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

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

∅ Fines calcaires

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

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

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

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

Les fillers calcaires peuvent avoir plusieurs rôles :

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

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

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

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

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

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

∅ **Les fines des sables**

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

∅ **Fumées de silice**

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

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

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

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

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

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

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

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

∅ **Cendres volantes**

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

L'utilisation de cendres volantes en général améliore la maniabilité. En termes de rhéologie, les cendres volantes réduisent le seuil de cisaillement, mais la viscosité plastique peut être augmentée ou diminuée. Par exemple, Sonebi [32] a constaté que l'utilisation de cendres volantes réduit ces deux paramètres dans le cas des BAP. Cependant, Park et al ont

constaté que la cendre volante a une faible incidence sur le seuil de cisaillement et sur la viscosité pâtes de ciment. Les cendres volantes peuvent aussi réduire la ségrégation et améliorer la stabilité [32].

Certains auteurs remarquent cependant que leur utilisation peut améliorer la fluidité, car leur forme sphérique permet de réduire les frottements entre les grains de ciment. Ferraris et al, montrent par ailleurs que le diamètre moyen des cendres volantes a une légère influence sur la valeur du seuil d'écoulement, les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines (diamètre moyen 3,1 μm). Associées à un superplastifiant, les cendres volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire à l'obtention d'une certaine fluidité (seuil de l'ordre de 20 Pa), mais le rapport E/C doit être suffisamment important (équivalent au rapport utilisé pour l'échantillon témoin), sinon la demande en adjuvant augmente fortement [32].

III.3 Les pouzzolanes

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

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

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

Les pouzzolanes doivent leur nom aux cendres volcaniques de la région de Pouzzoles, en Italie, dont l'utilisation et les propriétés liantes étaient connues à partir de l'époque romaine [60].

Leur composition chimique est proche de celle des cendres volantes, mais elles sont produites à haute température par les éruptions volcaniques.

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

En raison de leurs propriétés physiques, certaines pouzzolanes naturelles peuvent poser des problèmes. Par exemple, les terres à diatomées, du fait de leur nature anguleuse et poreuse, nécessitent un dosage en eau élevé. Certaines pouzzolanes naturelles voient leur activité améliorée par calcination entre 550 et 1100 C° selon le matériau concerné [63].

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

III.3.1 Caractéristiques des pouzzolanes

a. Compositions chimiques

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

Tableau III.1: Domaine élargi des compositions des pouzzolanes naturelles [62].

Eléments	Pourcentages	
	D'après VENUAT	D'après SERSALE
SiO₂	42 - 73	45 - 60
Al₂O₃ + Fe₂O₃	14 - 34	15 - 30
CaO + MgO + alcalins	03 - 21	≈15
Perte au feu	/	≈10

Une vraie pouzzolane est constituée essentiellement d'une petite quantité de minéraux cristallins : (feldspath, leucite, augite, ... etc.), plongée dans une abondante masse amorphe, dans la plus part des cas vitreux, ou tout au plus submicrocristalline, plus au moins altérée par les agents atmosphériques, poreuse au point qu'elle simule un gel et avec une ample surface interne. A côté de la silice solubilisable, elle présente des quantités significatives d'alumine solubilisable [62].

b. Composition minéralogique

Les roches volcaniques peuvent être constituées minéralogiquement comme suit :

- a) Les composés sialiques (où la silice et l'alumine dominant): dans lesquels on peut distinguer les feldspaths, (des plagioclases) et le quartz.

- b) Les composés ferriques (silicates contenant du fer ou (et) du magnésium) les plus répandus sont : les pyroxènes, les olivines, les oxydes de fer et les minéraux hydroxylés.

III.3.2 L'activité pouzzolanique

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

Le mécanisme de la réaction pouzzolanique peut se comprendre aisément grâce au diagramme triangulaire CaO-SiO₂-Al₂O₃ de Keil (voir Figure III.1) à partir des positions relatives des différents composés impliqués dans le phénomène de la réaction.

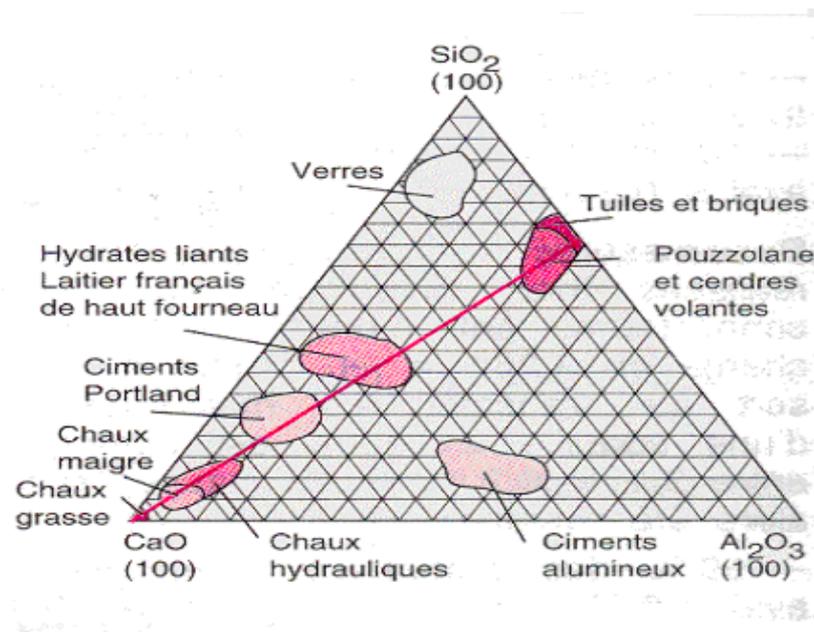


Figure III.1: Diagramme de Keil (Zone des pouzzolanes dans le système CaO – SiO₂ – Al₂O₃) [62]

L'eau n'étant pas représentée sur ce diagramme, la chaux grasse, vive ou éteinte, occupe le pôle CaO. Les briques, les pouzzolanes et les cendres volantes sont approximativement sur la ligne SiO₂-Al₂O₃ au premier tiers en partant de la SiO₂.

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

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

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

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

III.4 Les produits d'hydratation du Clinker

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

Cependant, devant les difficultés et les incertitudes des autres méthodes, il apparaît que l'étude de l'évolution du durcissement est sans doute plus logique puisqu'elle mesure directement le résultat recherché et que l'on devrait pouvoir aussi connaître l'apport des matériaux pouzzolaniques aux résistances mécaniques.

III.4.1 Les produits de la réaction pouzzolanique

Les produits issus des réactions entre les pouzzolanes et la chaux sont en général des minéraux mal cristallisés. Les espèces et les compositions des hydrates produits dépendent en général du caractère, c'est-à-dire de la composition chimique des produits pouzzolaniques, de

la structure cristalline des constituants de la pouzzolane ainsi que des conditions de l'hydratation (température, teneur en eau, serrage, ...). Ces hydrates sont pratiquement les mêmes que ceux observés lors de l'hydratation d'un ciment portland ou d'un ciment de laitier par exemple.

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

III.4.2 Etudes relatives à la Pouzzolane Naturelle

III.4.2.1 Exemple de la pouzzolane de Beni-saf

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

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

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

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

- ✓ Substituer un pourcentage de produit de moindre coût (pouzzolane naturelle) au ciment (CEM I) plus coûteux, diminue son coût de revient.

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

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

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

Récemment des recherches ont été entreprises sur la durabilité des mortiers à base de cette pouzzolane conservés dans des milieux agressifs Ghrici [75]. Ils ont constaté un gain dans les résistances à la compression des mortiers conservés dans une solution de 5% en sulfates de sodium avec l'utilisation de 20% et 30% de pouzzolane à moyen terme (6 mois). L'étude de la perméabilité aux ions chlore des bétons à base de cette pouzzolane naturelle a été limité à la mesure de la charge électrique traversant l'échantillon de béton Ghrici et al, 2006, 2007. Ce résultat a révélé une meilleure perméabilité du béton à base de 30% de pouzzolane par rapport à celui d'un béton témoin et un béton ternaire à base de 20% de pouzzolane naturelle et 10% de filler calcaire [56].

III.5 Conclusion

L'utilisation des additions minérales semble indispensable pour la confection de ces bétons autoplaçants. En effet, nous avons vu dans ce chapitre que les additions minérales contribuent à la diminution de la porosité des bétons durcis et donc à l'amélioration des résistances et de la durabilité.

D'autre part, l'ensemble de ces additions participent aux réactions d'hydratation en agissant comme des sites de nucléation quand la finesse d'un ajout est plus grande que celle du ciment substitué. Les additions peuvent être aussi des correcteurs granulaires et améliorent la cohésion inter granulaire.

Ces propriétés des additions minérales conduit très souvent à la diminution de la porosité du matériau durcie et donc améliorent ses résistances et sa durabilité.

Chapitre IV : Les Sédiments de Dragage

IV.1 Introduction

L'envasement est défini comme étant le dépôt de sédiments dans les retenues et barrages, réduisant ainsi leurs capacités de stockage. La construction d'un barrage change les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement et la capacité de transport des sédiments transportés par l'écoulement, la matière solide tend à se déposer à l'approche des plans d'eau, car en réduisant sa vitesse, l'écoulement perd petit à petit sa capacité de transport quand le cour d'eau s'approche et se jette dans le lac du réservoir, les particules grossières se déposent en premier ensuite les plus fines jusqu'à atteindre la digue, n' ayant pas où s'échapper le dépôt se tasse et se consolide en réduisant ainsi la capacité de stockage du réservoir, sachant qu'en moyenne 90% des sédiments transportés par le cour d'eau sont piégés [51].

Le secteur hydrique en Algérie compte 94 barrages répartis sur tout le territoire national, qui relèvent du Ministère des Ressources en Eau (MRE). L'envasement de ces barrages constitue sans doute la conséquence la plus grave de l'érosion hydrique. Le potentiel hydraulique perd annuellement environ 30 millions de mètres cubes. Selon l'ANBT, cette quantité est énorme pour certains barrages. L'envasement annuel peut représenter des valeurs de l'ordre de 6% du volume total, ce qui implique des coûts très élevés pour les opérations de dragages.

IV.2 Définition et origine

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

On distingue 2 origines aux sédiments:

- ∅ **Origine endogène** : les particules proviennent de la production autochtone du milieu. Il s'agit de débris de macrophytes comme les plantes aquatiques, les cadavres de microphytes et d'animaux [66].

∅ **Origine exogène** : il s'agit des particules qui sont issues du ruissellement des eaux ou bien transportées par les vents. D'origines naturelles ou anthropiques, elles proviennent de l'érosion des sols, de la décomposition de matière végétale, de l'apport de matière en suspension, matières organique, le nutriments ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques [67].

IV.3 Constitution des sédiments

Les vases sont constituées de 4 éléments principaux [68]

1. La matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates) ;
2. La fraction argileuse (kaolinite, illite ou montmorillonites) ;
3. La fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, acides fulviques et humiques);
4. Une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.

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

∅ **Les illites**

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

∅ **Les montmorillonites**

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

∅ **La kaolinite:**

D'origine chinoise, «Kaoling», La kaolinite se forme comme produit résiduel météorologique ou comme minerai sédimentaire, dans les sols. Elle est formée dans les

conditions de pression et de température de la surface de la terre (25–30°C et de pression atmosphérique). Associe dans son feuillet, une couche de tétraèdres à cœur de silicium et une couche d'octaèdres à cœur d'aluminium. La distance de la surface d'un feuillet à l'autre est de 0,74 nm. Elle appartient au système triclinique [71].

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

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

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

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

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

IV.4 Granulométrie des sédiments

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

Les différentes classes granulométriques couramment utilisées sont présentées dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1: Classes granulométriques d'un matériau [72].

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

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

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

Pour classer les matériaux fins dont la taille des particules est inférieure à 2 mm, les géotechniciens utilisent le diagramme triangulaire des sols fins de la figure IV.1. Ce type de diagramme est particulièrement adapté aux sédiments [74].

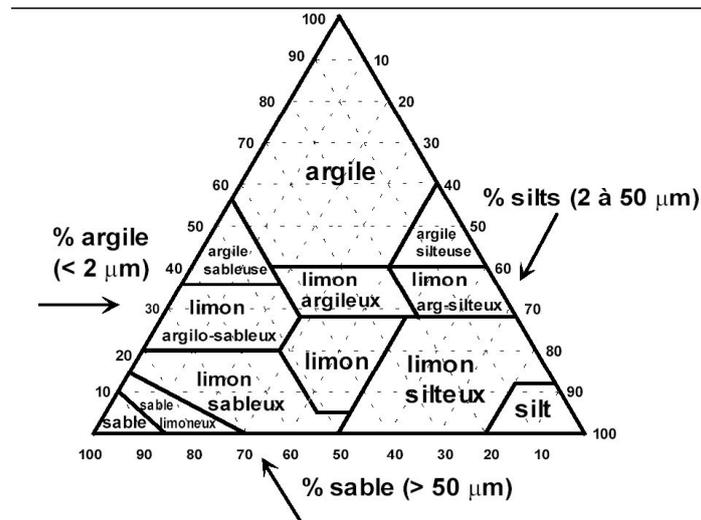


Figure IV.1: Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins [74].

IV.5 Le dragage des sédiments

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

La figure IV.2 présente une photo d'un engin mécanique de dragage :



Figure IV.2: Engin mécanique de dragage [73].

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

Il y a quatre principales techniques de dragage : dragage en eau, dragage hydraulique, dragage mécanique et dragage pneumatique, [73].

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.

IV.6 La valorisation des sédiments :

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 : [63]

- **L'agriculture** : ces sédiments sont un mélange de sable argile et de matières organiques nécessaires pour l'amélioration de la qualité des terres végétales, cela se fait sans aucun doute après un traitement au préalable de la pollution des sédiments contaminés.
- **Le Génie Civil** : 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.

Les sédiments de dragage peuvent être utilisés :

- dans l'industrie du ciment.
- dans la fabrication des briques.
- dans les bétons et les mortiers.
- dans les Routes (en couche de forme).

IV.6.1 Critères de valorisation des sédiments de dragage :

Suivants des études sur le traitement des sédiments de dragage doit répondre et dépendre impérativement des conditions et critères :

- 1. Critères économiques :** Il faut que l'étude économique soit acceptable afin de justifier le traitement, sa faisabilité doit être faite sur les volumes et quantité à draguer. L'utilisation préférentielle sera déterminée par le meilleur rapport cout/efficacité et la mise en dépôt ne doit pas être écartée, principalement pour les sédiments très pollués.
- 2. Critères techniques de traitement :** Cela concerne le choix des procédés de traitement qui dépend de la quantité de la matière draguée et la nature de pollution trouvé, parmi les techniques de traitement possibles à utiliser : biologique, physico-chimique et thermique.
- 3. Critères environnementaux:** Les matières draguées ne devront en aucun cas être une source de pollution pour l'environnement en changeant l'aspect de la nature du sol, l'eau et l'écosystème.
- 4. Critères réglementaires :** Déterminer le niveau de contamination selon la législation en vigueur du pays ou les travaux de dragage se déroulent: les sédiments sont considérés sains ou contaminés.

On peut citer quelques exemples d'études et d'applications récentes :

1. Pouzzolanité de sédiments calcinés :

Les particules fines draguées des barrages ont des structures cristallines qui, moyennant un traitement thermique, deviennent amorphes et réagissent avec l'eau comme les liants hydrauliques avec une correction par de la chaux. Expérimentalement, des échantillons de vase calcinés à une température inférieure à 800°C ont montré des structures amorphes qui ont réagi avec la chaux pour donner des C-S-H de même type que ceux des réactions pouzzolaniques [63]. Nous avons ainsi conçu un ciment pouzzolanique à base de vase calcinée. Les résistances mécaniques obtenues sont égales voire meilleures que le ciment seul.

2. Corrosion des armatures du Béton armé à base de ciment de vase calcinée :

Une des causes majeures de dégradation des structures et ouvrages en béton armé est la corrosion des armatures qui se développe principalement selon deux processus : la carbonatation du béton qui provoque une corrosion uniforme le long de l'armature et

l'attaque par les chlorures qui génèrent des piqûres de corrosion. Cette étude menée par Khelifa en 2013 a mis en évidence l'influence de la vase de barrage calcinée, utilisée en tant qu'addition minérale dans les bétons d'enrobage sur le temps d'initiation et le taux de corrosion [63].

3. Béton autoplaçant à base de vase de barrage :

A l'aide de la méthode des "plans d'expériences", ont été confectionnés des pâtes homogènes, fluides capables de s'écouler sous leur propre poids. Ces pâtes autoplaçantes ont montré un comportement rhéologique viscoplastique. Quatre facteurs ont été utilisés dans la confection de la pâte; le ciment, la pouzzolane artificielle (vase calcinée), le superplastifiant et l'eau. La pâte en question est constituée de vase calcinée de Bouhanifia a été la base de la confection d'un béton autoplaçant [63].

4. Mortier de réparation à base de sédiment :

La vase de Bouhanifia calcinée, est appliquée dans la conception du ciment utilisé dans un mortier de réparation pour béton endommagé: ce travail, réalisé par Zerrouk en 2014, a consisté en la confection de cylindres de béton qui ont été endommagés au laboratoire sur une épaisseur de 1,5 cm. Les dégradations ont été réparées avec ce mortier par rechemisage des éprouvettes [63].

5. Brique à base de sédiment de barrage :

La vase de barrage, stabilisée au ciment portland, dans des conditions hydrothermales en autoclave, a montré de bonnes résistances à la compression. Sous l'action de la température et de l'humidité, une réaction chimique entre la chaux et la silice se produit pour donner des silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui sont à l'origine des résistances mécaniques observées.

Quatre mélanges ont été testés par Semcha [63] et il a enregistré sur la figure, une résistance optimale pour le mélange à 40% de ciment et 60% de vase pour les trois séries d'essais.

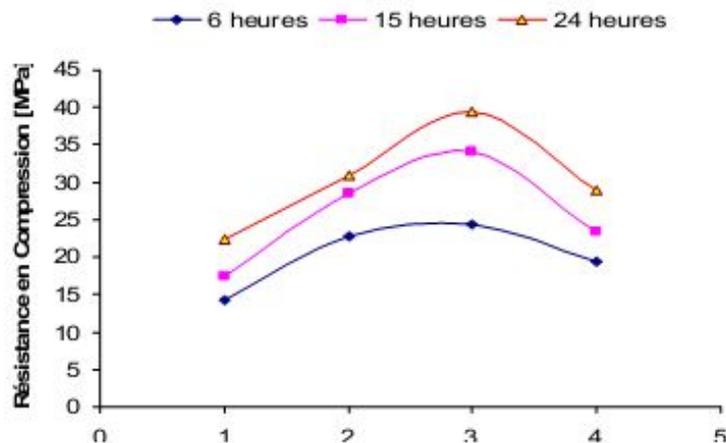


Figure IV.3: résistances mécaniques des mélanges [20].

IV.6.2 Valorisation comme constituant du ciment :

Plus de 60 % du CO₂ émis par l'industrie cimentière provient de la décarbonation du calcaire. La réduction de la part du clinker par l'ajout d'autres constituants dans le ciment au sens de la norme NF EN 197-1 permet de réduire le volume d'émission.

L'intégration des sédiments comme constituant peut être envisagée à condition que ceux-ci possèdent un caractère pouzzolanique. Ce caractère est essentiellement lié au type et au degré de cristallinité des espèces argileuses. Un faible degré de cristallinité rend la silice et l'alumine partiellement mobilisables. L'activité pouzzolanique est liée à cette particularité [30].

Rodriguez et al réalisent en 2013 des mélanges avec des sédiments provenant de 5 retenues Algériennes, sans traitement préalable, avec du ciment. L'objectif était d'évaluer l'activité pouzzolanique des sédiments. Parmi les essais réalisés, des éprouvettes de mortier normalisé (EN 197-1) sont confectionnées. 20 % du ciment de type CEM I 42.5 N sont remplacés par des sédiments. Pour quatre des sédiments, la résistance à la compression à 90 jours est plus faible que celle du témoin. Pour le dernier sédiment, provenant de la retenue de Tipaza, la résistance à la compression à 90 jours est supérieure au témoin. Or, il s'agit également du sédiment dont les minéraux argileux ont la plus faible cristallinité parmi les sédiments étudiés.

Lorsque les sédiments fins ne possèdent pas naturellement un caractère pouzzolanique prononcé, il est possible de développer ce dernier en calcinant les sédiments à une température adaptée. Durant le Processus de cuisson, les structures de l'argile vont se

modifier vers un état « cristallographiquement » désorganisé. Une cuisson trop poussée fait apparaître une recristallisation de la structure. Dans la norme EN 197-1, il est précisé que les pouzzolanes naturelles calcinées (Q) sont des constituants composés de matériaux d'origine volcanique, d'argiles, de schistes ou de roches sédimentaires, activés thermiquement ». Ainsi, les sédiments fins, ayant une fraction argileuse importante, pourraient rentrer dans cette définition. Dans le CEM II, la part de pouzzolanes naturelles calcinées dans la composition du ciment peut atteindre 35 % [30].

Dans cette optique, Semcha [63], parvient à fabriquer une pouzzolane artificielle à partir de sédiments fins issus du barrage de Fergoug (Algérie).

Les sédiments subissent d'abord une cuisson à 750°C durant 5h. Cette température optimale de cuisson est déterminée à l'aide d'une technique d'analyse minéralogique (DRX, ATD, ATG). Trois taux de substitution de ciment sont testés : 30, 50 et 70 % de la masse totale. Avec une substitution de 30 % de ciment par des sédiments calcinés, les performances mécaniques sont semblables aux témoins composés uniquement de ciment.

Il conclut que ce « ciment pouzzolanique de synthèse composé de 30 % de sédiment calciné et 70 % de ciment Portland (CEM I), représente un véritable intérêt économique (économie de 30 % de ciment) avec des performances mécaniques similaires, voire meilleures qu'un ciment ordinaire ». Une comparaison des résistances à la compression à 28 jours de la pouzzolane artificielle, avec une pouzzolane naturelle utilisée par les cimentiers, a été également réalisée. La pouzzolane de synthèse à base de sédiments calcinés présente un meilleur comportement mécanique [32].

Benamara [117] et al, effectuent à nouveau une étude sur l'élaboration d'une pouzzolane de synthèse à partir des sédiments du barrage de Fergoug. Les sédiments bruts ont une granulométrie étalée avec un d_{90} égal à 80 μm . L'analyse chimique des sédiments est donnée dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 : Analyse chimique de la vase Fergoug [117].

Constituants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	SO ₃	PF
Sédiment Brut	43,79	08,41	04,01	16,02	2,07	00,13	25,07

Le traitement thermique est le même que celui utilisé par Semcha [63] c'est-à-dire une température de cuisson de 750°C, durant 5 heures et une montée de température de 5°C/minute. Après analyse par DRX des produits cuits, on observe la disparition des raies

caractéristiques de la kaolinite, de la gibbsite et des carbonates. Des éprouvettes cylindriques de pâte pure, de 2 cm de diamètre et de 4 cm de hauteur sont ensuite confectionnées avec des proportions de sédiment calciné de 0 (témoin), 30, 50 et 70 %. La quantité d'eau de gâchage est déterminée par l'essai de consistance normale. Le rapport E/L varie entre 0,3 et 0,45 pour le mélange contenant le plus de sédiment calciné. Les résistances mécaniques à la compression simple de différents mélanges sont présentées sur la figure IV.4.

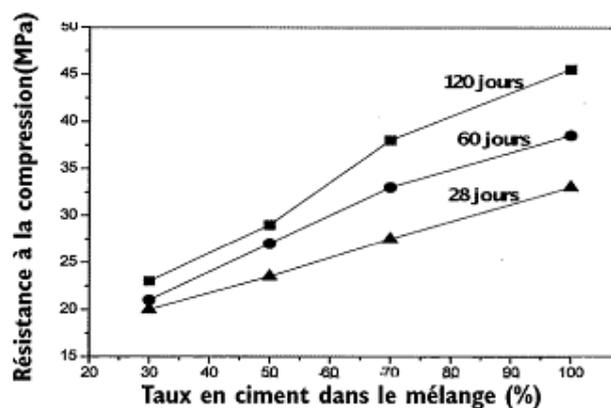


Figure IV.4 : Résistance mécanique à la compression des pâtes de sédiments calcinés/ciment [117].

Le mélange à 30 % de sédiments calcinés à 750°C est jugé honorable selon les auteurs puisqu'il conduit à des résistances en compression égales à 85 % de celles obtenues avec le ciment seul.

Bibi et al ont mené une étude en 2008 sur un sédiment venant d'une autre retenue algérienne, à savoir les sédiments issus du dragage du barrage Ksob. L'objectif des travaux est d'évaluer l'influence d'ajout de matière argileuse calcinée sur les propriétés des matériaux cimentaires. Pour ce faire, deux matériaux sont étudiés : une marne rouge et des sédiments du barrage. Leurs compositions chimiques et minéralogiques sont respectivement rapportées dans le tableau IV.3 et dans le tableau IV.4.

Tableau IV.3 : Composition chimique des matériaux argileux bruts en % [118]

Constituants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF
Sédiment de Ksob	37,37	13,52	05,00	17,02	02,75	0,36	1,92	0,45	20,73
Marne rouge	32,96	6,87	3,01	23,24	5,80	1,19	1,96	0,01	24,46

Tableau IV.4 : composition minéralogique des matériaux argileux bruts en % [118]

	Quartz	Calcite	Dolomite	Feldspath plagioclase	Gypse	Minéraux ferrugineux	Kaolinite	Illite Muscovite	Chlorite
Sédiment de Ksob	37,37	13,52	5,00	17,02	2,75	0,36	1,92	0,45	20,73
Marne rouge	32,96	6,87	3,01	23,24	5,80	1,19	1,96	0,01	24,46

Ces matériaux font également l'objet d'une analyse thermique ATD/ATG. La marne rouge et le sédiment sont respectivement calcinés à 780 et 750°C.

Sept ciments sont ensuite élaborés à base de clinker (65 à 95 %), de gypse (5 %) et de matériaux argileux calcinés (10 à 30 %). Pour caractériser les ciments, ceux-ci subissent une analyse spectrométrique à fluorescence X. Pour discuter des compositions chimiques des ciments, les modules siliciques, aluminoferrique et hydraulique sont calculés. Avec l'augmentation de la part de matériaux calcinés dans la composition du ciment, on constate que : la masse volumique des ciments diminue, la finesse augmente, le temps de prise augmente légèrement et la demande en eau augmente pour une consistance normale. Des essais mécaniques, à 2 et 28 jours, ont été réalisés sur des mortiers et des bétons pour chacun des sept ciments. Les résistances en compression à 28 jours sont synthétisées dans le tableau IV.5 il a été observé que l'intégration de 10 % de matériaux calcinés procure aux mortiers et bétons des résistances assez proches de celles obtenues en utilisant un ciment Portland ordinaire [34].

Tableau IV.5 : Résistance à la compression simple des mortiers et bétons à base de ciments composés de matériaux argileux calcinés [34].

Proportion de matériaux calcinés dans les ciments	Témoïn	Marne rouge			Sédiment de Ksob		
	0	10	20	30	10	20	30
Rc des mortiers à 28j (MPa)	44,22	43,5	39,38	36,41	42,63	38,01	35,67
Rc des bétons à 28j (MPa)	58	57	51,75	45,25	54	50,83	42,25

IV.7 Présentation du barrage Chorfa

Le barrage Chorfa II (ainsi appelé après la réalisation de sa nouvelle digue) situé dans la daïra de Sig, à une quarantaine de kilomètres du chef-lieu de la wilaya de Mascara de capacité initiale 83 Hm³, régularise les eaux du sous bassin de la Mekerra (Oued Mebtouh), et alimente les localités de Oued Mebtouh, Boudjebaha El-Bordj et Aïn Adden et qui relèvent du territoire de la wilaya de Sidi Bel-Abbès. La production actuelle dépasse les 25 000 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.

La figure IV.5, présente la Situation donnée par satellite du barrage Chorfa II :

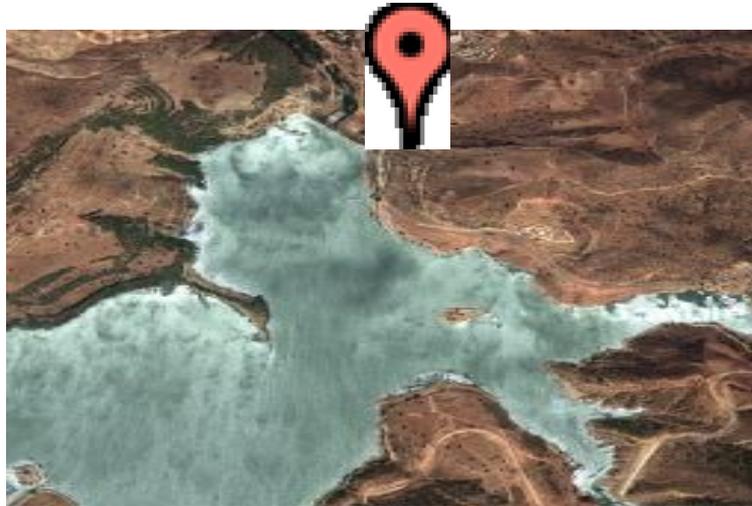


Figure IV.5: Situation donnée par satellite du barrage Chorfa II.

Les figures IV.6, IV.7 et IV.8 présentent des photos réelles du barrage Chorfa II :



Figure IV.6: Vue générale du barrage Chorfa II



Figure IV.7: Vue du côté interne de la digue du barrage Chorfa II



Figure IV.8: La digue du barrage Chorfa II

IV.8 Conclusion :

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

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

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

Plusieurs travaux ont été menés dernièrement pour étudier la possibilité de valoriser les sédiments de dragage dans le génie civil notamment dans les matériaux cimentaires et voir son impact sur les propriétés mécaniques et sur la résistance dans les milieux agressifs des mortiers et bétons, soit en substitution d'une partie du ciment soit en addition au béton, mais rares sont les études détaillées réalisées sur les performances des bétons à base de sédiments de dragage et encore moins sur des BAP.

L'objectif de cette étude est de valoriser un sédiment de dragage qui est la vase dragée du barrage Chorfa II après calcination dans la confection d'un BAP et d'optimiser le pourcentage de substitution pour un BAP avec des caractéristiques techniques satisfaisantes et une bonne durabilité.

Problématique et Objectif de la recherche

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

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

Le dévasement est un moyen de lutte efficace, néanmoins il engendre un autre problème lié au stockage et à l'évacuation de la vase en aval du barrage. En effet le dragage du barrage de Chorfa a constitué un vrai problème écologique dans le périmètre irrigué de Sig. Chose pour laquelle, le dragage demeure une opération incontournable pour le maintien du fonctionnement du barrage. Seulement, le dragage génère des quantités colossales de vase extraite qui se retrouvent confrontées un sérieux problème d'élimination. Ces mêmes problèmes ont donné naissance à la politique de valorisation des sédiments de dragage dans plusieurs domaines, le génie civil entre autres.

Le domaine du génie civil peut en effet contribuer à la valorisation des sédiments de dragage et ce dans les différents domaines comme les techniques routières, la mécanique des sols ou la technologie des bétons. Ceci est conditionné par la composition chimique et minéralogique du sédiment qui permet de mieux choisir le domaine de valorisation suite à une identification établie en amont sur les sédiments en question. Certains des sédiments traités ayant des propriétés pouzzolaniques peuvent être utilisées en tant qu'ajouts ou substituts au ciment ce qui fait de la technologie des Bétons Autoplaçants (BAP) une voie privilégiée de leur valorisation

Le domaine de recherche en terme de la valorisation 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 concrétisée.

Le domaine de valorisation et de l'exploitation de la vase des barrages représente pour la recherche un champ 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 autoplçants.

Pour enrichir et approfondir les recherches entamées sur la vase, notre étude a été engagée et qui consiste à caractérisation de la vase extraite de barrage chorfa vis-à-vis de la pouzzolanicité en vue d'optimiser les pourcentage de sa substitution partiel au ciment dans la formulation de béton autoplçant à performances répondant aux normes en vigueur. C'est pour cette raison que nous avons jugé utile d'apporter notre modeste contribution afin de pouvoir valoriser la vase du barrage Chorfa II et donc encourager son utilisation à des fins d'exploitation comme matériau valorisable entrant dans la composition du béton autoplçant.

Il s'agit donc d'identifier au mieux la vase chorfa et la caractériser chimiquement et minéralogiquement afin de pouvoir argumenter le choix du domaine de sa valorisation. Par la suite un travail de formulation de BAP avec des matériaux locaux à partir de plusieurs taux de substitutions partielles du ciment par la vase après traitement thermique.

Après élaboration des formulations, les BAP doivent être caractérisés à l'état frais pour la validation des formulations en question, ensuite la caractérisation à l'état durci pour la détermination des différentes résistances mécaniques et le contrôle de ségrégation statique pour pouvoir s'étaler sur la mesure des paramètres de transfert en l'occurrence la porosité, la perméabilité au gaz et la diffusion des chlorures. En effet, la durabilité des BAP dépend en grande partie de ces paramètres.

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

✓

Ecologiques

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

✓

Economiques

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

✓

Technologique

L'optimisation du pourcentage de substitution du ciment par la vase calcinée consiste à trouver le pourcentage qui donne un compromis optimal entre les effets positifs et négatifs de la substitution permettant ainsi l'élaboration des bétons autoplçants à performances égales et éventuellement meilleurs que les bétons ordinaires ou autoplçants vierges de toute substitution, ce qui donnera un véritable succès à la technologie des bétons en général et à celle des BAP en particulier.

Chapitre I : Matériaux utilisés

I.1 Introduction

Ce travail consiste à optimiser le taux de substitution en vue d'élaborer des BAP de propriétés convenables. En effet la nature de l'addition minérale et ses taux de substitutions sont des facteurs qui influencent considérablement le comportement à l'état frais et à l'état durci des bétons autoplaçants.

Afin de bien mener ce travail sur la vase calcinée, à tous les autres matériaux utilisés (*ciment, sable, gravier et adjuvant*) sont les mêmes pour tout le programme expérimental de cette étude. A cet effet, nous présenterons dans ce chapitre les matériaux qui ont été utilisés durant cette étude.

I.2 Le ciment

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

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

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

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

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

Tableau I.1: Composition chimique du ciment utilisé

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

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

Tableau I.2: Composition minéralogique du clinker

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

La masse volumique apparente est obtenue par la pesée d'un récipient d'un litre rempli de ciment sans aucun tassement. La masse volumique absolue du ciment a été déterminée, selon NF P 18 – 555, par le pycnomètre et le benzène.

La consistance normalisée de la pâte de ciment est déterminée selon la norme NF EN196-3 à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une sonde. Le temps de prise est déterminé selon la norme NF EN 196-3 à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une aiguille. Ces caractéristiques physiques sont groupées dans le tableau I.3.

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

L'état du ciment	Caractéristiques	Valeurs
Ciment Anhydre	Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.18
	Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.13
	Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3180
Pâte de Ciment	Teneur en eau pour consistance normale (%)	25
	Début de prise	2h 45
	Fin de prise	3h 55

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

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

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

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

D'où on peut classer ce ciment dans la classe du CPA 42.5 puisque la résistance à la compression à 28 jours (Rc28) vérifie [60]:

$$Ls < R_{C28} < Li$$

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

I.3 Notion du liant équivalent

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

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

L'ordre des réactions au sein d'un mélange est révélé dans la littérature comme suit : Il y a d'abord hydratation du clinker ensuite la formation de portlandite puis réaction pouzzolanique [63]. Les ciments à base d'ajouts cimentaires (à caractère pouzzolaniques) sont élaborés avec les deux occupations suivantes :

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

I.4 La vase de dragage

Les bétons autoplaçants sont caractérisés par un volume de pâte plus important que les bétons vibrés. Dans notre étude, ce volume de pâte sera garanti essentiellement par le dosage important de liant équivalent composé de ciment CPA CEMI 42.5 et un d'un pourcentage de vase calcinée, défini dans la partie précédente à savoir : la vase calcinée du barrage de Chorfa.

La vase étudiée a été prélevée en aval du barrage Chorfa II dans la zone de rejet. Après curage, des essais de caractérisation physiques et chimiques ont été effectués sur des échantillons prélevés par soins, et préparés selon les protocoles cités dans la partie 1.

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

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

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



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

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



Figure I.2: La vase de Chorfa à l'état naturel, séchée, broyée, tamisée, et calcinée

La composition chimique de cette vase calcinée a été effectuée au laboratoire LTPO, les résultats d'analyse sont représentés dans le Tableau I.5:

Tableau I.5: Caractéristiques chimiques de la vase calcinée

Les composants chimiques	Les teneurs %
SiO ₂	55.34
Al ₂ O ₃	15.75
CaO	13.82
Fe ₂ O ₃	7.43
SO ₃	0.17
SO ₄	/
Total	92.51
CaCO ₃	23.5
Carbonates	4.64
CO ₂	2.04
H ₂ O	0.87

Selon la norme ASTM C618 :

silice-CaO=41,52% \geq 34%, donc la vase calcinée comporte une phase vitreuse.
 $\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3 = 78,52\% \geq 70\%$, La vase calcinée du barrage de Chorfa est donc pouzzolanique.

I.4.1 Caractéristique physiques de la vase

La vase étudiée a fait l'objet d'une caractérisation physicochimique afin de pouvoir l'identifier.

∅ Les masses volumiques (apparente et absolue)

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

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



Figure I.3: Pycnomètre de Le Chatelier.

∅ Consistance normale et temps de prise

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

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



Figure I.4: Essais de consistance normale et de prise par l'appareil de Vicat

∅ La finesse de mouture (Surface Spécifique Blaine)

C'est la surface développée des grains contenus dans une masse donnée. La surface spécifique Blaine de la vase calcinée et de la pouzzolane naturelle ont été déterminées par la méthode du perméabilimètre de Blaine selon la norme NF EN 196-6 et exprimée en cm^2/g , dans le laboratoire de la cimenterie LAFARGE située dans la région de Sig.

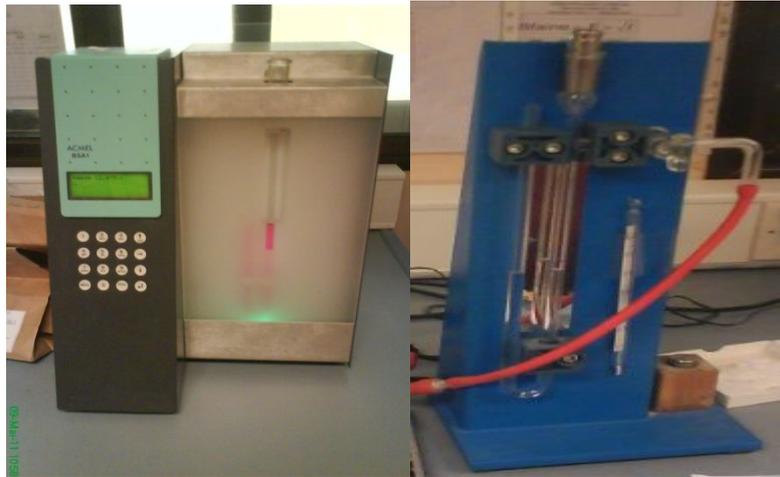


Figure I.5: Perméabilimètre de Blaine automatique et manuel de la cimenterie LAFARGE

La grande finesse de notre sédiment s'explique par la taille des particules qu'on peut observer sur la courbe granulométrique illustrée dans la figure I.6 ainsi que l'état de surface des grains de la vase. Ces derniers ont été observés au microscope électronique à balayage (MEB).

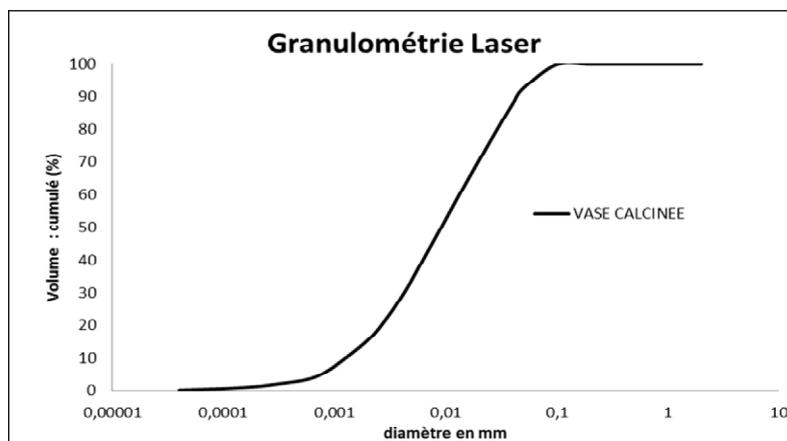


Figure I.6: Distribution granulométrique des grains de la vase Calcinée

L'analyse granulométrique a été effectuée au granulo-laser par voie humide selon la méthode de Fraunhofer. La répartition granulaire des grains de la vase calcinée montre que les diamètres de la majorité des grains se situent en dessous de 50 μm et que le diamètre moyen à 50% du volume de l'échantillon est de l'ordre de 10 μm , ce qui confirme la grande finesse de notre sédiment traité.

L'état de surface des grains de la vase peut avoir aussi un rôle dans la finesse. Ces derniers ont été observés au microscope électronique à balayage (MEB) au laboratoire GeM de l'IUT de Saint-Nazaire (France). La figure I.7 montre l'apparence de ces grains au MEB.

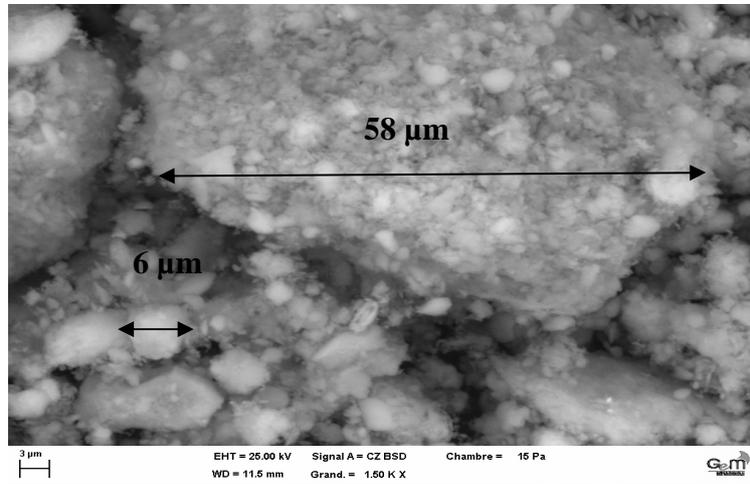


Figure I.7: Grains de vase calcinée observé au MEB (×1500)

L'image sus indiquée montre des grains de vase calcinée de différentes tailles et leurs surfaces sont rugueuses. En outre, la taille des grains explique la forte demande en eau de cette vase lors d'un essai de consistance normale effectué par l'appareil de Vicat, où une pâte de 100% de vase est en consistance normale avec un rapport Eau/Vase de 0.45 alors qu'une pâte de 100 % de ciment est en consistance normale pour un E/C égal à 0.26.

I.4.2 Indice d'activité Pouzzolanique

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

La comptabilisation du substitut dans le liant équivalent pour le calcul du rapport $E/L_{\text{équi}}$, suit les règles normatives XP 18-305 et EN 206-1 où le liant équivalent est donné par l'équation (1):

$$L_{\text{equi}} = C + K \times A \quad (1)$$

Où **C** : masse du ciment, **K** : le coefficient d'activité (il est en fonction de i) et **A** : la masse du substitut utilisé.

Le coefficient **K** à son tour est déterminé par l'une des formules (2) ou (3) respectivement :

$$\mathbf{K} = 1 - [(1/P) \times [1 - 0.5 \times (E/C)]] \times (1-i) \quad (2)$$

$$\mathbf{K} = 3 \times i - 2 \quad (3)$$

Des prismes de 4x4x16 cm³ ont été confectionnés pour les deux liants équivalents, respectivement à base de vase calcinée et à base de ciment seul afin de mesurer les résistances en compression sur les demi-éprouviettes rompues par flexion à 90 jours. Le tableau I.6 illustre les valeurs de **i** et de **K**.

Tableau I.6: Valeurs de l'indice et du coefficient d'activité de la vase calcinée

		Compression (MPa)	Traction (MPa)
Mortier	Mortier 1 (MT)	58,13	12,91
	Mortier 2 (25% vase)	57,59	12,64
Indice d'activité	$i(p) = f_p(t) \div f_0(t)$	0,99	
Coefficient d'activité	K = 3 × i - 2	0,97	

L'indice d'activité de la vase calcinée est proche de 1, ceci est un signe d'une forte activité pouzzolanique.

I.5 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.

Dans cette étude deux superplastifiants ont été utilisés en l'occurrence SIKA VISCOCRETE TEMPO 12. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère poly- carboxylate-polyacrylate. (Voir annexe) et le "MEDAFLOW 113" non chloré à base de copolymère acrylique développé par la société GRANITEX Algérie et conforme à la norme NF EN 934-2. Les deux adjuvants améliorent la stabilité, limitent les risques de ségrégation et rendent la formule moins sensible aux variations d'eau et des constituants. Ils permettent aussi d'obtenir des résistances mécaniques élevées au jeune âge.

I.6 Les granulats

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

Les différents granulats ont été lavés et séchés à l'air libre, et on distingue les gravillons et les sables. Le tableau I.7 montre l'apparence des granulats utilisés :

Tableau I.7: Constituants utilisés du squelette granulaire

Désignation	Sable de mer [SM]	Sable de carrière [SC]	Gravier 3/8 [G3/8]	Gravier 8/15 [G8/15]
Apparence				
Nature	Siliceux 0/D= 0/1	Calcaire 0/D= 0/4	Calcaire 0/D=3/8	Calcaire 0/D= 8/15

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

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

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

Les principales caractéristiques physiques des sables de mer et de concassage et des graviers sont représentées dans les tableaux I.8.

Tableau I.8: Récapitulatif des caractéristiques physiques des sables et graviers utilisés

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

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

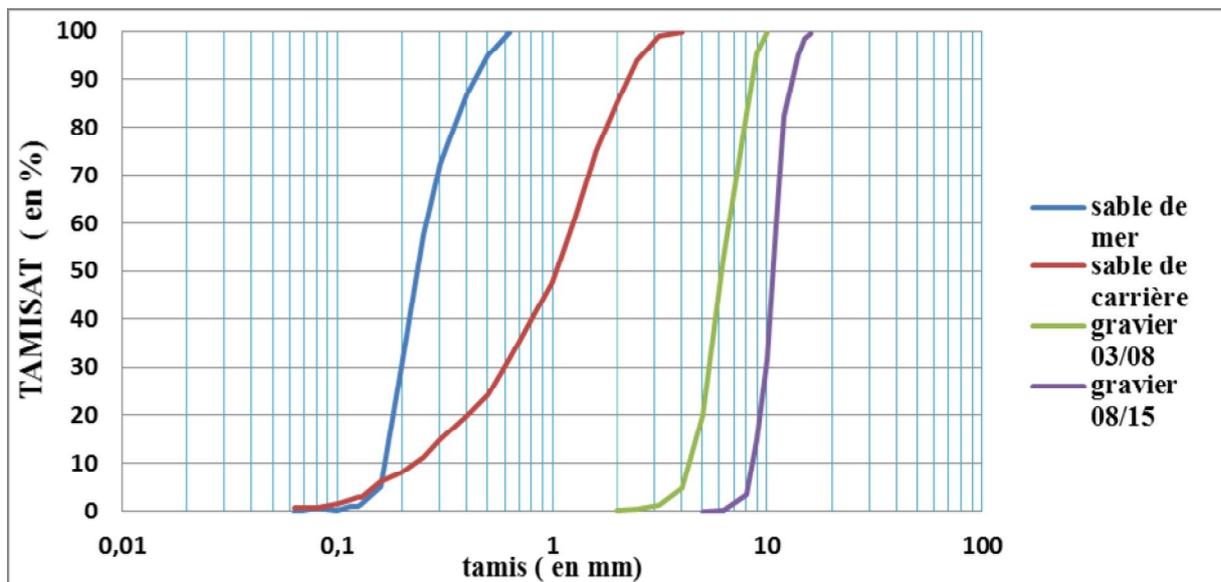


Figure I.8: Courbes granulométriques des sables de mer, de carrière et les graviers

Les analyses chimiques des granulats sont illustrées dans le tableau I.9 :

Tableau I.9: Analyse chimique du sable de mer de Sidi-Lakhdar et des granulats de Kristel

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

Les analyses chimiques, des sables et graviers, ont été effectuées par le laboratoire LTPO, Oran. Le sable de concassage (Carrière) et les graviers 3/8 et 8/15 ont la même composition chimique car ils proviennent tous du même gisement de roche calcaire de la région de Kristel, Oran.

I.7 Conclusion

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

La vase issue du dragage de Chorfa II contient un pourcentage élevé en SiO₂, ce qui lui donne un potentiel pouzzolanique non négligeable, d'où la nécessité d'un traitement thermique (la calcination) afin de la rendre réactive.

Suite aux essais préliminaires d'identification de la vase Chorfa, il a été constaté que cette dernière est doublement plus fine que le ciment, de plus les images réalisés au MEB révèlent une structure poreuse des grains de vase, ce qui se traduit principalement par une grande demande en eau pour l'hydratation, raison pour laquelle deux types d'adjuvants ont été adoptés afin de pouvoir en choisir un à l'issue des essais à l'état frais des BAP.

Chapitre II : Programme expérimental

II.1 Introduction

Le travail d'optimisation de formulations de béton nécessite un série d'essais et de protocoles expérimentaux afin d'avoir suffisamment de données concernant les matériaux utilisés et de pouvoir argumenter les résultats ainsi que pour trouver des solutions aux éventuels problèmes rencontrés au cours de l'étude.

Dans ce chapitre, tous les essais réalisés dans cette étude sont présentés selon les normes en vigueur. Les essais en question touchent l'identification de la vase étudiée, la caractérisation de coulis et de MBE, la caractérisation des BAP à l'état frais et à l'état durci et par rapport aux indicateurs de durabilité en l'occurrence les porosités à l'eau et au mercure, la perméabilité au gaz et la diffusion des chlorures.

II.2 Caractérisation de la vase Chorfa

Les caractéristiques physicochimiques de la vase et son comportement au sein du mélange cimentaire sont des paramètres indispensables à caractériser au mieux, avant d'introduire la vase dans une matrice cimentaire. C'est pourquoi nous avons adopté de multiples essais, détaillés dans ce chapitre, afin de bien la caractériser.

II.2.1 Diffraction des Rayons X (DRX)

La méthode générale consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X, et à regarder l'intensité de rayons X qui est diffusée selon l'orientation dans l'espace [43]. L'instrument utilisé est un diffractomètre (Figure II.1). Il comprend un tube de rayons X qui produit des faisceaux de rayons X monochromatiques. Ce tube peut effectuer une rotation de 0° à 90° [44].

Un minéral en poudre est placé sur une lame de verre en position d'être irradié par un faisceau de rayons X issu du tube. Pour détecter les rayons X diffractés, un détecteur électronique est placé du côté opposé de l'échantillon par rapport au tube, et peut aussi effectuer une rotation de 0° à 90° [44].

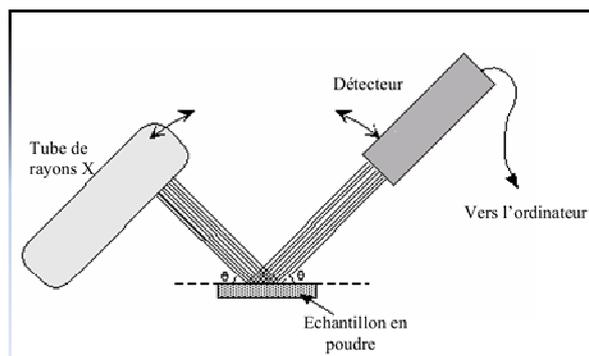


Figure II.1: Schéma d'un diffractomètre [44].

L'instrument utilisé pour faire tourner le tube de rayons X et le détecteur est un goniomètre. Le goniomètre mesure avec précision l'angle de diffraction θ et envoie l'information à l'ordinateur pendant que le détecteur mesure l'intensité des rayons X diffractés de l'échantillon (en points/secondes) et envoie à son tour ces informations à l'ordinateur.

La DRX ne fonctionne que sur la matière cristallisée (minéraux, métaux, céramiques, polymères semi-cristallins, produits organiques cristallisés), mais pas sur la matière amorphe (liquides, polymères amorphes, verres) ; toutefois, la matière amorphe diffuse les rayons X, et elle peut être partiellement cristallisée, la technique peut donc se révéler utile dans ces cas-là. Par contre, elle permet de reconnaître des produits ayant la même composition chimique brute, mais une forme de cristallisation différente, par exemple de distinguer les différentes silices (qui ont toutes la même formule brute SiO_2 : quartz, cristobalite...), les différents aciers (acier ferritique, austénite...) ou les différentes alumines (qui ont toutes la même formule brute Al_2O_3 : corindon/alumine α , γ , δ , θ ...) [44].

Dans cette étude, les analyses DRX ont été effectuées sur échantillons de poudre de vase brute et vases calcinée au Laboratoire de Chimie des Polymères, Université d'Oran Es-Senia Faculté des sciences, département de chimie. L'appareillage utilisé comprend un diffractomètre « D8 Advance » muni d'une anticathode en cuivre et une baie de mesure pilotée via un ordinateur contient le logiciel « X'PERT PLUS ». Cette installation permet de déterminer la cristallographie d'une poudre et de sa fraction argileuse ($\leq 2 \mu\text{m}$) sur lame mince orientée comme le montre la figure II.2.

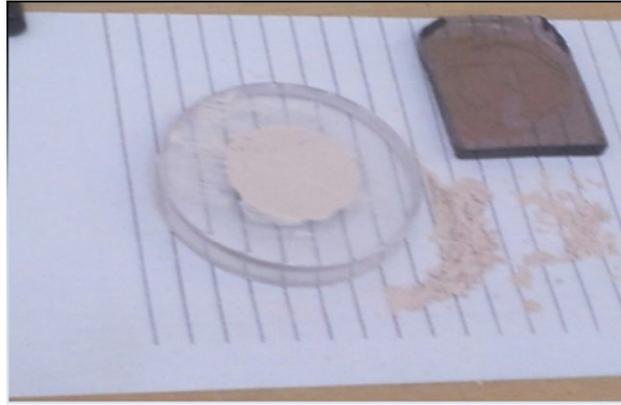


Figure II.2: Le porte échantillon.

La lamelle est ensuite placée dans le diffractomètre (figure II.3). Les paramètres d'analyse sont les suivantes : angle de balayage (2θ) : de 1° à 70° avec un pas de $0,02^\circ$ et la température : 25°C .



Figure II.3: L'appareil de diffractomètre D8 Advance.

II.2.2 Essai Chapelle modifié

Compte tenu de la valeur de l'indice d'activité de la vase calcinée calculée dans le chapitre des matériaux utilisés, un test Chapelle modifié a été réalisé afin de mettre en évidence les propriétés pouzzolaniques de la vase calcinée. Ce test visait à mesurer approximativement la consommation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ par la vase calcinée en présence de chaux dans un mélange. A cet effet, les sédiments bruts et traités ont été respectivement mélangés à de la chaux aérienne et de l'eau. Les mélanges ont été placés dans des flacons hermétiques à 20°C jusqu'à des délais de 28 jours où une analyse thermogravimétrique (ATG) a été effectuée.

L'analyse thermogravimétrique a pour objet la caractérisation des matériaux à partir de leur décomposition. Les hydrates du ciment se décomposent en libérant de l'eau, sous forme de vapeur, et du dioxyde de carbone sous l'effet d'une température élevées. La technique d'analyse consiste en la mesure de la perte de masse d'un échantillon soumis à des variations de température dans une atmosphère contrôlée. L'évolution de la masse de l'échantillon est mesurée et reliée à la température. Des pertes en masse rapides peuvent avoir lieu pour certaines températures caractéristiques et sont la signature de la décomposition de certains composés chimiques. La perte en masse permet d'identifier la présence de ces composés ainsi que leur quantité. Par exemple, entre 400 et 600°C, il se produit une dés-hydroxylation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Cette perte de masse apparaît alors sous la forme de pics centrés autour de la température caractéristiques (DTG).

Les analyses thermogravimétriques ont été effectuées en utilisant un METTLER TOLEDO TGA/DSC1 (Figure II.4), où de 20 à 30 mg de pâtes durci à 20°C a été placé dans un creuset de platine de 70µl. La plage de chauffage dynamique varie entre 25 ° C et 1050 ° C



Figure II.4: Appareil ATG Appareil METTLER TOLEDO TGA/DSC

À l'issue d'un essai d'ATG-DSC, la décomposition des hydrates du ciment s'exprime par des paliers décroissants sur la courbe d'ATG et des pics endothermiques sur la courbe de la première dérivée de l'ATG. La représentation de la perte de masse sous la forme de sa dérivée par rapport au temps (DTG), montre la correspondance entre les pertes de masses et ceux dérivées (DTG) comme le montre la Figure II.5.

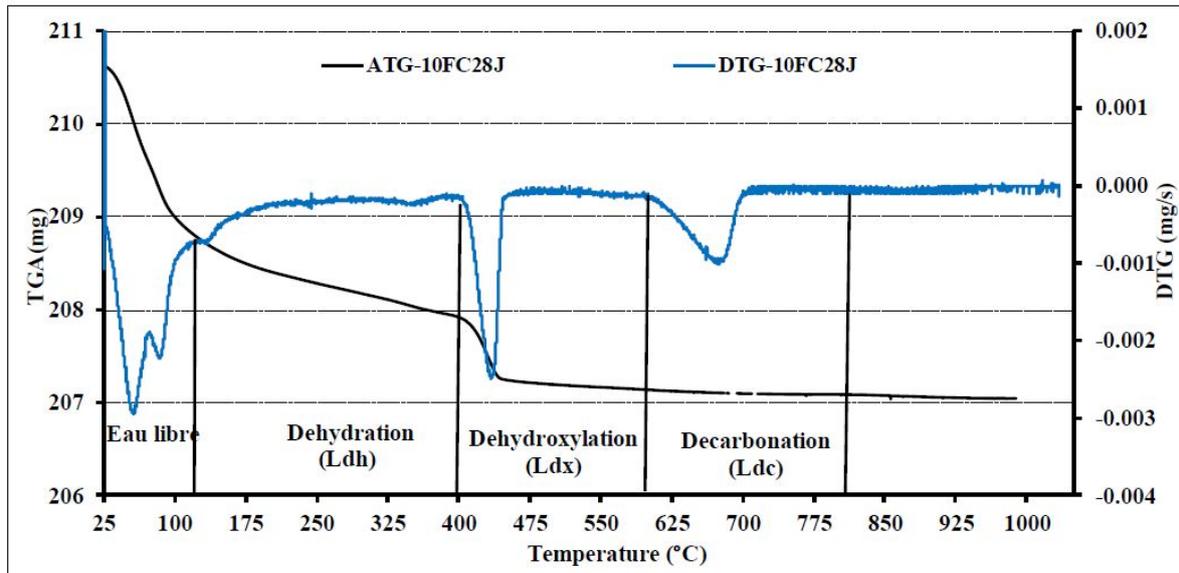


Figure II.5: Exemple principaux pic DTG pour un mélange à base de ciment et de fines calcaires [81]

A partir de la Figure II.5, on distingue trois phases majeures de décomposition d'un échantillon testé :

- La première phase correspond au départ d'eau évaporable (l'eau des pores) et la décomposition des hydrates (Ldh), entre 20 et 400°C;
- La deuxième correspond à la déshydroxylation (Ldx) de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en CaO , entre 400 et 600°C.
- La dernière phase correspond la décarbonatation de CaCO_3 (Ldc) en CaO et CO_2 , entre 600 et 800°C.

Dans cette étude les deux échantillons (mélange à base de vase brute et un autre à base de vase calcinée) ont été chauffés dans des creusets d'oxyde d'aluminium jusqu'à 1050°C sous atmosphère d'azote et à une vitesse de chauffage de 5°C/min.

II.2.3 Microcalorimétrie Isotherme

L'hydratation d'une matrice cimentaire est un processus exothermique. L'hydratation du ciment peut donc être suivie en mesurant la chaleur dégagée pendant ce processus réactionnel. Actuellement, il existe quatre types de calorimétries : la calorimétrie adiabatique, la calorimétrie semi-adiabatique, la calorimétrie isothermique et la calorimétrie de solution.

Dans ce travail, le dégagement de chaleur des pâtes a été mesuré à 20°C à l'aide d'un microcalorimètre isotherme multi-canal de type TAM Air (figure II.6).



Figure II.6: microcalorimètre isotherme multi-canal.

Après malaxage, deux échantillons de pâte d'environ 4g sont placés dans des flacons plastiques de 20 ml. Les flacons sont introduits dans le microcalorimètre et l'acquisition des dégagements de chaleur est faite directement sur ordinateur. Les résultats obtenus permettent de quantifier l'influence de l'incorporation de la vase calcinée ainsi que les pourcentages de substitution sur la réactivité du liant au jeune âge. Les réactions sont supposées exothermiques.

II.3 Essais sur coulis

A cause de la grande finesse de la vase, il a été inévitable d'étudier l'influence de la vase calcinée sur le comportement rhéologique des mélanges ciment+Vase en présence de super plastifiant. A cet effet, des essais au cône de Marsh et au mini cône ont été réalisés sur des coulis et qui consistent à mesurer la fluidité.

II.3.1 Le cône de Marsh

Le cône de Marsh (figure II.7) est utilisé pour mesurer la fluidité des coulis de ciment ou de bentonite. C'est pourquoi cette technique est adoptée pour la mesure de la fluidité et l'étude des propriétés rhéologiques des coulis de ciment. L'essai consiste à mesurer le temps qu'il faut pour vider un cône contenant 1 litre de coulis à travers un orifice d'évacuation de 5 mm de diamètre. Ce temps est de 31.5 ± 0.5 secondes pour l'eau.

Le cône de Marsh doit être solidement fixé pour ne pas être déplacé par les vibrations et sa partie supérieure doit être horizontale. On commence par obturer l'orifice d'évacuation inférieur et on verse 1 litre de coulis dans le cône et on change le pourcentage de l'adjuvant SIKA d'une part et d'autre part celui de GRANITEX pour l'ensemble des pourcentages de vase (10, 20 et 30 %). On démarre le chronomètre au moment où on libère l'orifice. On arrête le chronomètre dès que le 1000 ml de coulis s'est déversé dans un cylindre gradué que l'on place sous l'orifice du cône. Le temps d'écoulement que l'on mesure permet d'évaluer la fluidité du coulis. Plus ce temps est long, plus le coulis est visqueux et plus il est court, plus le coulis est fluide.



Figure II.7: Le cône de Marsh

II.3.2 L'étalement au mini-cône :

Les essais au mini-cône ont été réalisés sur des pâtes autoplaçantes, un mini-cône inspiré du cône d'Abrams et dont les dimensions lui sont proportionnelles a été utilisé (Figure II.8), il servira essentiellement à la détermination des diamètres d'étalement sur une plaque de verre horizontale et humide en fonction des paramètres de composition (rapport eau/ciment, taux de substitution du ciment et dosage en superplastifiant), ces diamètres sont mesurés après 1 minute d'étalement, la même procédure est respectée pour tous les mélanges.

Les principaux avantages de cet essai sont la facilité de sa mise en œuvre puisqu'il nécessite peu de préparation et une faible quantité de matériaux (volume inférieur à 40ml), le faible volume manipulé implique une moindre complexité de l'expérience et une durée réduite.

Les essais sont reproductibles et souvent utilisés pour la détermination du point de saturation en superplastifiants d'un mélange cimentaire. Les diamètres d'étalements doivent être compris entre 14 et 16 cm.

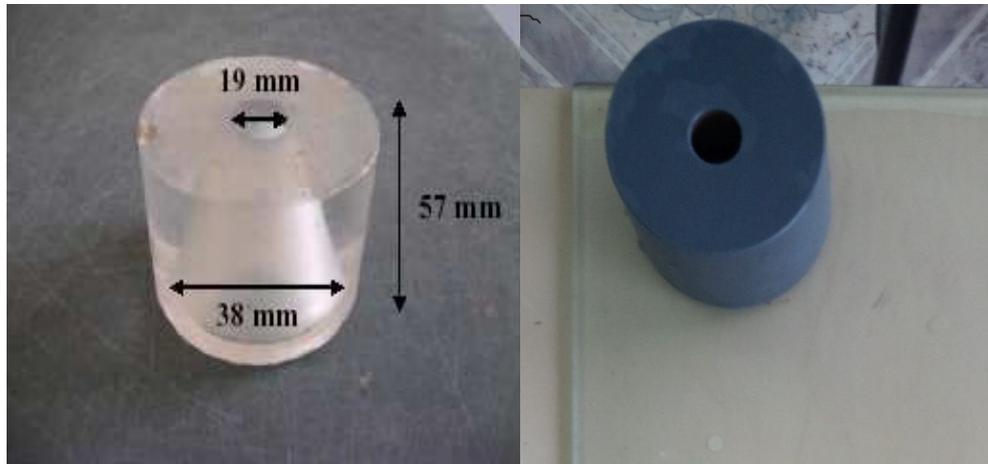


Figure II.8: Mini-cône pour la mesure de l'étalement

La composition des coulis est définie par la norme EN 196-1. Le coulis doit être composé en masse, d'une part de ciment, et d'autre part d'eau (le rapport eau / ciment = 0.35) et d'un adjuvant. Les pourcentages de substitution en vase pour cet essai sont (0%, 15% et 30%).

II.4 Caractérisation du MBE

Comme abordé dans la partie I, un travail de formulation de MBE a été entamé dans le but d'économiser la quantité des matériaux lors de la confection des BAP à base de différents pourcentages en vase calcinée. En effet l'incorporation de la vase calcinée dans les formulations de BAP engendre une perte d'ouvrabilité qui doit être corrigée par un réajustement du dosage en superplastifiants. Une formulation n'est validée qu'après avoir satisfait l'ensemble des recommandations de l'AFGC concernant l'ouvrabilité des BAP. Le passage par un MBE réduit les nombre d'essais à l'état frais sur BAP.

Une fois le MBE formulé, un essai d'étalement au mini-cône à mortier est réalisé. Il s'agit d'un moule tronconique indéformable en PVC (Figure II.9). Le moule doit être suffisamment lourd pour ne pas se soulever lorsqu'il est rempli d'un mortier fluide.

Les dimensions du cône sont les suivantes :

- Diamètre du cercle de l'ouverture supérieure: $50 \pm 0,5$ mm
- Diamètre du cercle de l'ouverture inférieure: $100 \pm 0,5$ mm
- Hauteur : 150 ± 1 mm

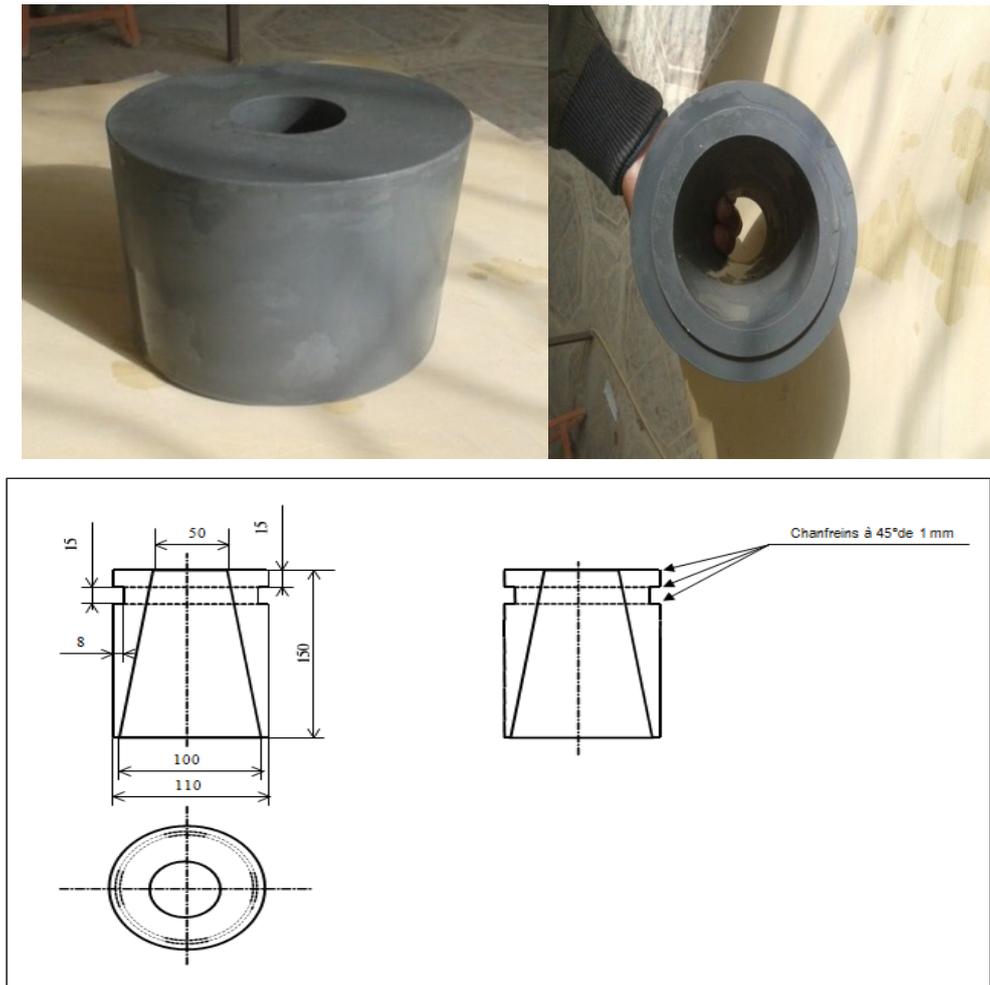


Figure II.9: Mini-cône à mortier

Une plaque de travail non absorbante, non réactive aux liants, lisse et sans aspérité de 450 mm de côté. Cette plaque est munie d'une nivelle hémisphérique pour le réglage de l'horizontalité

L'étalement du mortier peut être mesuré à l'aide d'un réglet de 500 mm gradué en mm ou d'un pied à coulisse de 500 mm de course.

II.5 Caractérisation des BAP à l'état frais

4 formulations de BAP ont été étudiées dans ce travail, une de référence et trois à base de 10, 20 et 30% de vase calcinée respectivement. Les 4 BAP ont fait l'objet de caractérisation aux états frais et durci.

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

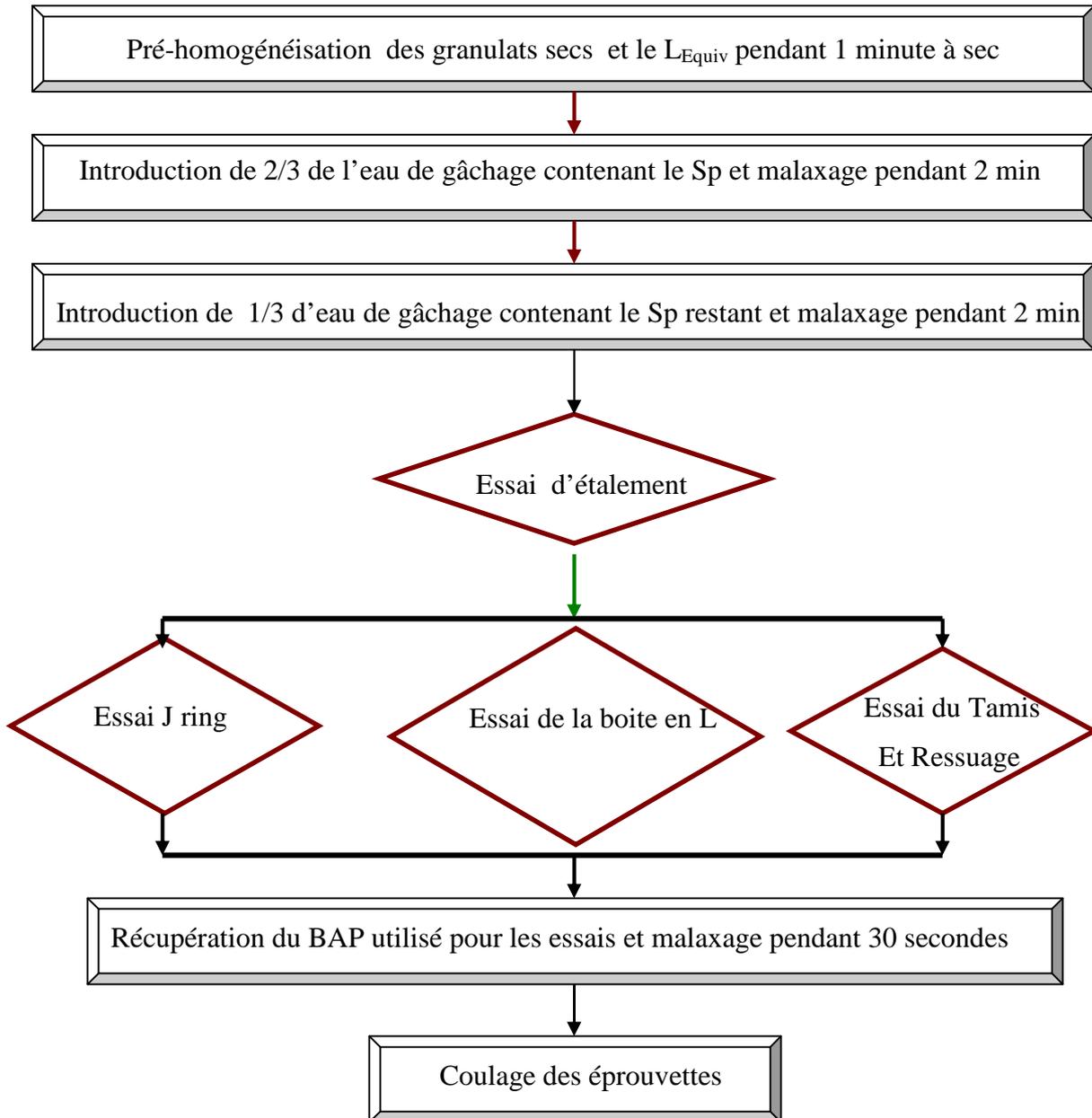


Figure II.10: Organigramme des séquences de malaxage des BAP

II.5.1 Etat frais

La caractérisation à l'état frais des bétons de cette étude s'est limitée aux essais recommandés par l'AFGC [1] : étalement au cône, J-Ring, écoulement à la boîte en L, stabilité au tamis et ressuage.

a. L'essai d'étalement

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

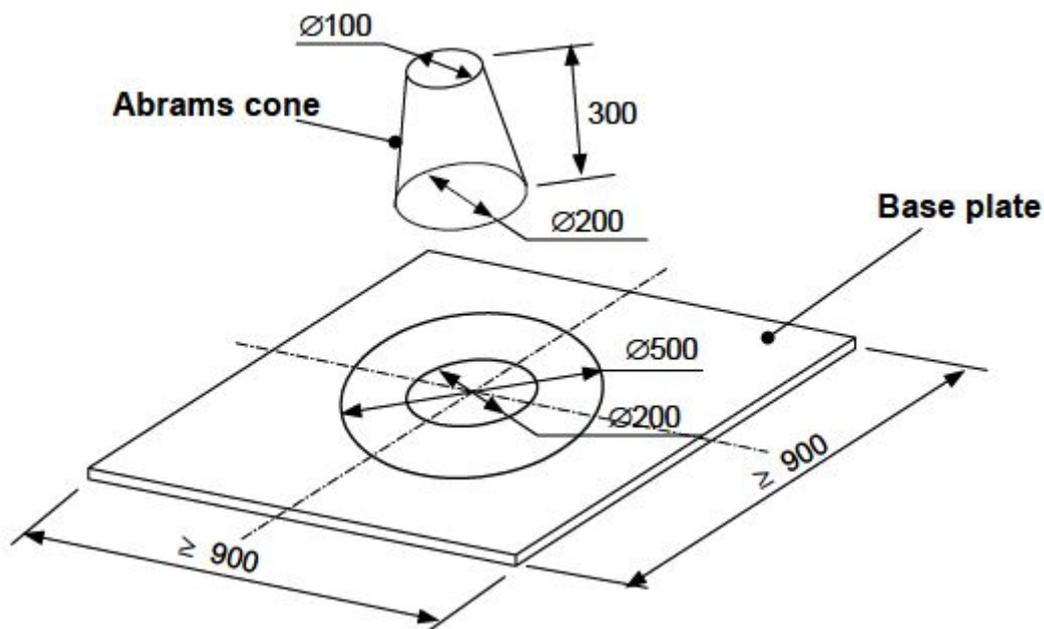


Figure II.11: Paramètres de l'essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow)

b. L'essai à la boîte en L

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

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

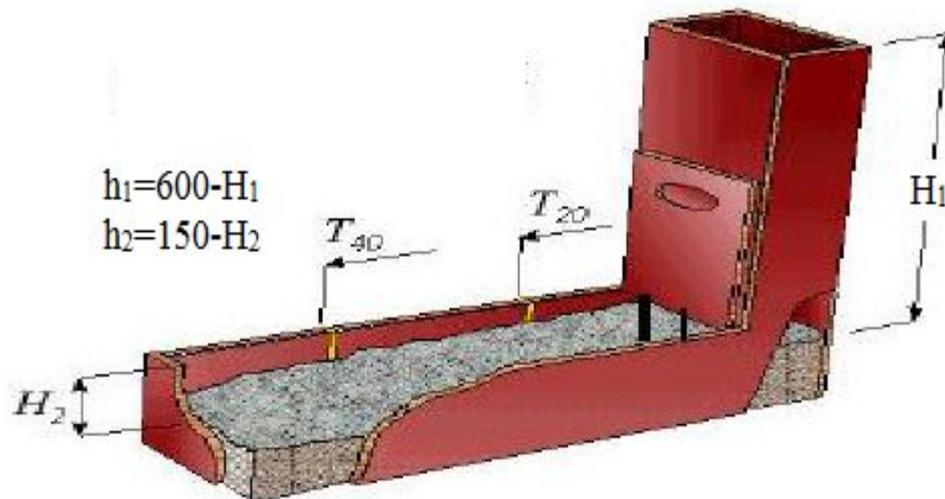


Figure II.12: Paramètres de l'essai de la boîte en L

c. L'essai J-Ring

Cet essai consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armatures afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. Le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique (Figure II.13). On caractérise donc la tendance à la ségrégation et l'enrobage d'armatures. De plus, la répartition des granulats doit être homogène.

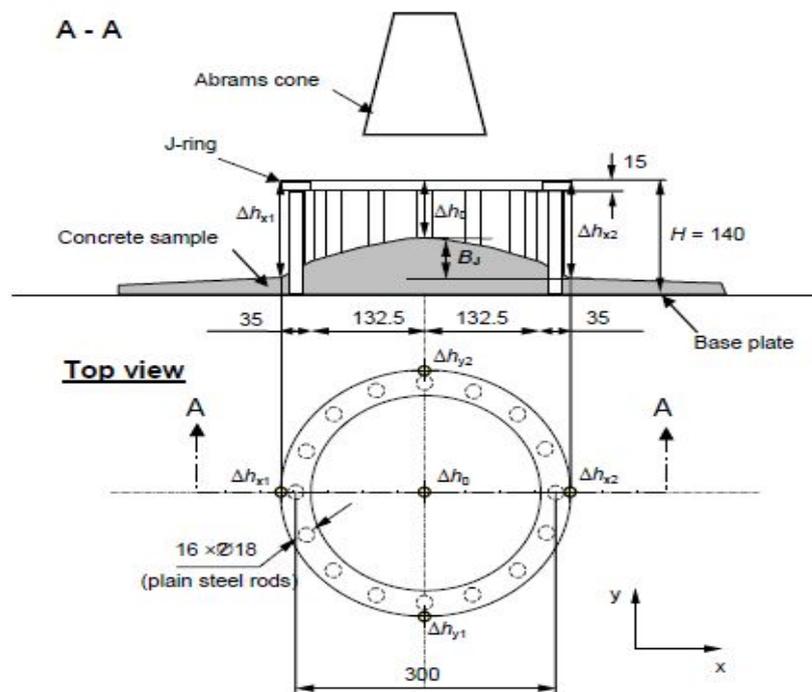


Figure II.13: Paramètres de l'essai J-Ring

d. L'essai de stabilité au tamis

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

$0\% < P_{\text{Laitance}} < 15\%$: stabilité satisfaisante,

$15\% < P_{\text{Laitance}} < 30\%$: stabilité critique,

$P_{\text{Laitance}} > 30\%$: stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, BAP inutilisable).

e. L'essai de ressuage

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

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

II.6 Etat durci**II.6.1 Résistance à la compression**

La résistance en compression est mesurée de façon systématique car elle fait partie des spécifications de la norme EN 206-. La perte en résistance du béton en compression peut être causée par une rupture intergranulaire résultat d'une matrice très résistante associée à une qualité de granulat plutôt moyenne, ou à cause d'une mauvaise matrice cimentaire peu performante au regard des granulats plus performants.

Dans cette étude les essais de résistance en compression ont été effectués sur les éprouvettes (10x10x10) cm³ coulées à l'issue des opérations de malaxage des différents BAP et conservés dans l'eau à 20±2°C, ces éprouvettes ont fait l'objet d'essais de compression à plusieurs échéances allant de 3 à 360 jours à l'aide d'une presse mécanique selon la norme NF P 18-406.

Les essais d'écrasements ont été effectués au laboratoire de matériaux et géotechniques de l'université de Mostaganem. La presse utilisée est d'une capacité maximale de 3000 kN, avec une vitesse de chargement aux environs de 0,5 MPa/s.

II.6.2 Contrôle de ségrégation statique (Essai de la colonne)

L'un des moyens de contrôler la ségrégation statique d'un BAP consiste à scier une (ou deux) éprouvette (s) de béton transversalement (forme de disque), au nombre de trois (Disque supérieur, médian et inférieur) et à observer la répartition des granulats sur la hauteur de l'éprouvette comme le montre la figure II.14.

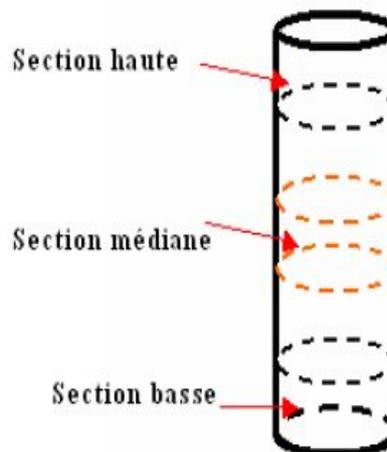


Figure II.14: Principe de l'essai de colonne

II.7 Mesure du retrait

Il s'agit d'évaluer le retrait, ou le gonflement, sur les éprouvettes de BAP de dimensions $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$ où il s'agit de mesurer à différents temps t , la variation de longueur des éprouvettes $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$, par rapport à leurs longueurs initiales à un temps t_0 pris pour origine.

Les mesures du retrait endogène et du retrait total ont été réalisées 24h après le moulage. Pour chaque composition, les variations dimensionnelles ont été effectuées avec un comparateur sur trois éprouvettes conservées dans une salle maintenue à 20°C et 50% d'hygrométrie relative (retrait total) et sur trois autres éprouvettes protégées avec l'aluminium alimentaire pour empêcher tout échange hydrique (retrait endogène). La différence de ces 2 retraits permet d'obtenir le retrait de dessiccation. Un suivi de poids a été également effectué tel le décrit la norme NF P 15-433.

Les essais de retrait se sont déroulés dans une salle maintenue à une température de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à $50\% \pm 5\%$.

Les moules utilisés ont été équipés de plots de retrait en laiton. Les plots sont vissés au moule au moment de la mise en place du BAP puis désolidarisés du moule avant le démoulage. Après durcissement, les éprouvettes $7 \times 7 \times 28$ sont donc munies à leurs deux extrémités de plots.

Un déformètre (tel que celui schématisé sur la figure II-15) équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une exactitude inférieure ou égale à $0,005\text{ mm}$. Une tige de 280 mm de longueur doit permettre l'étalonnage du déformètre (réglage à zéro). Cette tige est en Invar de façon à ce que les variations de température qu'elle peut connaître au cours de la manipulation n'entraînent pas de modification appréciable de sa longueur.

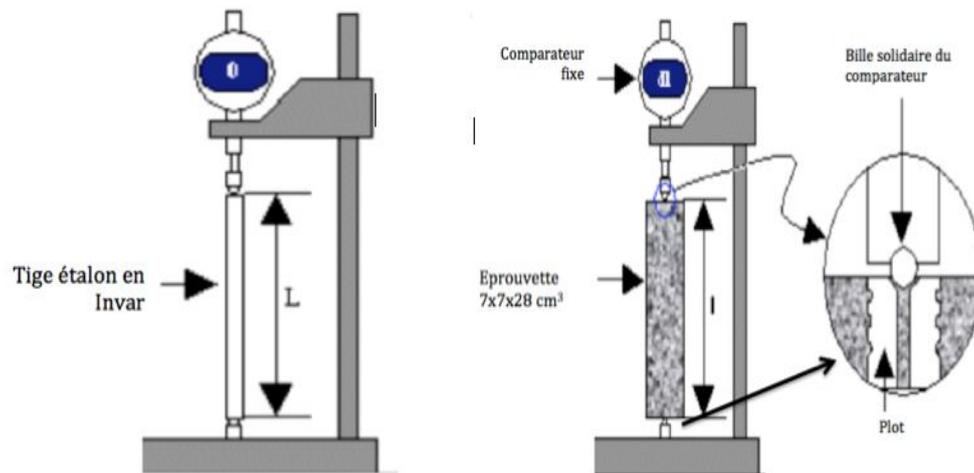


Figure II.15: Déformètre pour la mesure du retrait.

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur $L = 280\text{ mm}$. Soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t ; l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

$$l = L + dl(t) \quad (21)$$

Soit $l(t_0)$ la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0) \quad (22)$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L} \quad (23)$$

$\Delta l(t)$ est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air, $\Delta l(t)$ est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, $\Delta l(t)$ peut être positif: il y a alors gonflement. Le poids aussi est pris à chaque mesure du retrait.

II.8 Mesure de porosité

La porosité est un paramètre indispensable à mesurer dans un matériau, car elle joue un rôle très important sur les propriétés de résistance et de transfert notamment dans les bétons, et plus particulièrement la porosité capillaire interconnectée.

La porosité accessible à l'eau est ainsi un paramètre incontournable dans une approche microstructurale, Cependant la méthode de détermination de la porosité accessible à l'eau est une méthode globale qui ne permet pas de différencier les familles de pores. Nous avons donc complété les résultats obtenus en porosité accessible à l'eau par des analyses de distribution porale obtenues par porosimétrie au mercure.

II.8.1 Porosité accessible à l'eau (Porosité totale)

Le protocole de détermination de la porosité accessible à l'eau est décrit dans le document AFPC AFREM « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité ». Cette méthode consiste à effectuer une pesée du matériau dans l'air puis dans un liquide de masse volumique connue.

La porosité accessible à l'eau (ε) est calculée suivant l'équation ci-dessous :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad (24)$$

Où

- ε : porosité accessible à l'eau (en%)
- M_{eau} : masse du corps d'épreuve immergé dans l'eau (kg)
- M_{air} : masse du corps d'épreuve imbibé pesé dans l'air (kg)

- M_{sec} : masse du corps d'épreuve sec pesé dans l'air (kg).
- ρ_{eau} : masse volumique de l'eau utilisée pour la pesée hydrostatique (kg/m³)

Chaque éprouvette a été séchée en étuve à 50°C jusqu'à masse constante (une différence de moins de 0.1% entre 2 pesées effectuées à 24 heures d'écart). Les essais sont réalisés sur 3 éprouvettes sous forme de disc (diamètre 11 cm et de hauteur 5 cm) pour chaque BAP. Les pesées sont réalisées à l'aide d'une balance précise à 0.01g près.

II.8.2 Porosimétrie au Mercure

La porosimétrie au mercure est une technique d'investigation des milieux poreux. La méthode consiste à faire pénétrer le mercure dans les pores du matériau sous pression croissante. Le mercure est, vis à vis de la quasi-totalité des solides, un fluide non mouillant, c'est à dire qu'il ne pénètre pas spontanément dans la porosité comme le ferait l'eau par exemple. Ceci permet de contrôler l'injection au moyen de la pression. A mesure que la pression augmente, le mercure occupe des régions de plus en plus confinées de la porosité, remplissant des pores de plus en plus fins. Les appareils les plus puissants sur le marché permettent de faire varier la pression de 3 kPa à 400 MPa, donnant accès aux pores dont la taille va de 400 nm à 6 nanomètres environ.

Sans entrer dans le détail du fonctionnement des appareils, il faut indiquer quelques points importants pour l'interprétation des résultats obtenus. L'opération est pratiquée sur des échantillons de petite taille, typiquement centimétrique, qu'on introduit dans une cellule appelée pénétromètre (Figure II.16). L'échantillon peut se présenter sous différentes formes. Il peut s'agir d'un fragment unique du matériau, ou de plusieurs fragments, ou de granulés, voire de poudre, dans la mesure où les particules composant la poudre sont elles-mêmes poreuses et la taille des pores comprise dans la gamme de l'appareil.

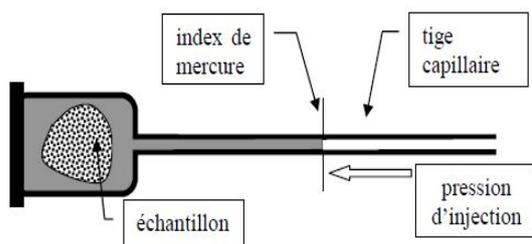


Figure II.16: Pénétromètre

L'échantillon préalablement séché est placé dans le *pénétrromètre* (Figure II.16). Un vide poussé est ensuite établi. C'est la raison pour laquelle l'échantillon doit être sec, car la pression lors de la mise sous vide est en principe inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau. Lorsqu'on veut opérer sur un échantillon incomplètement séché, il faut modérer la mise sous vide. Le mercure est ensuite introduit dans le pénétrromètre à basse pression, puis la pression est augmentée progressivement palier par palier. A chaque palier de pression, le volume qui pénètre dans les pores est mesuré après stabilisation. En effet, la pénétration n'est pas instantanée, et les porosimètres sont équipés d'un dispositif de régulation de la pression jusqu'à stabilisation à la valeur de consigne. Le volume de mercure pénétré est mesuré au moyen de la position du ménisque dans la tige capillaire du pénétrromètre. Il est poussé par de l'air pour les pressions comprises entre la pression de remplissage et la pression atmosphérique ambiante, puis par de l'huile.

En faisant l'hypothèse de pores cylindriques, on peut relier la pression d'injection au rayon des pores accessibles par l'équation de Washburn (Laplace) :

$$r = \frac{2\sigma_{Hg} \cos\theta}{P_{Hg}} \quad (25)$$

Où :

- r: rayon des pores remplis (m)
- σ_{Hg} : tension superficielle du mercure (N/m)
- θ : angle de contact du mercure sur le solide (°)
- P_{Hg} : pression d'injection (Pa)

Les essais ont été réalisés à 20°C à l'aide d'un porosimètre à mercure AUTOPORE IV de Micromeritics qui peut détecter des pores jusqu'à 3nm (Figure II.17).

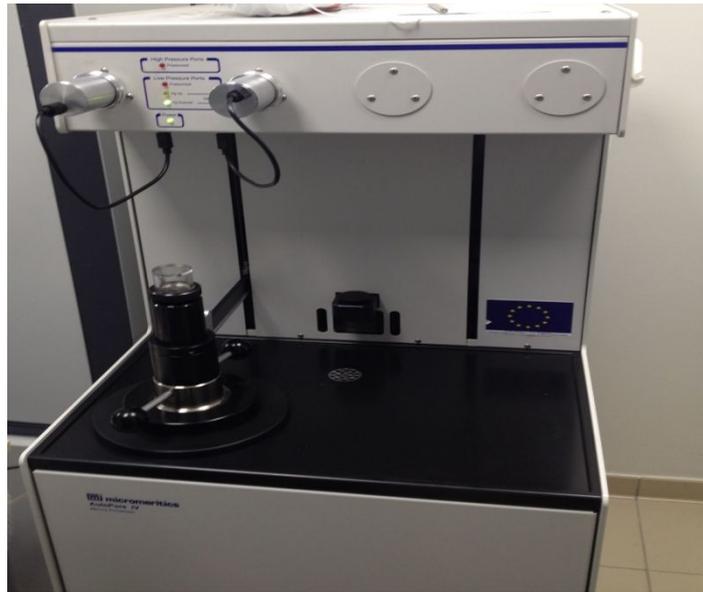


Figure II.17: Porosimètre à mercure AUTOPORE IV de Micromeritics

Cet appareil nous permet d'avoir des informations très fiables concernant la distribution et la taille des pores. L'essai a été effectué à l'âge de 120 jours avec des pressions d'intrusion de mercure allant de 0.1 à 206 MPa. Les résultats sont ensuite combinés pour obtenir la distribution porale sur toute la gamme de rayons étudiés (3 nm à 100 μm). Préalablement à l'essai, les échantillons sont séchés en étuve à 50°C puis ramenés à température ambiante dans un dessiccateur.

II.9 Perméabilité au gaz

L'essai de perméabilité au gaz est régi par le mode opératoire AFPC-AFREM. Il consiste à appliquer un gradient de pression constant à un échantillon de béton et à mesurer le flux de gaz traversant l'échantillon en régime permanent. Il est alors possible de calculer la perméabilité apparente, qui dépend de la surpression appliquée. L'essai est réalisé pour 3 valeurs de surpression à savoir 1, 2 et 3 bar. À partir des valeurs des perméabilités apparentes il est possible de déterminer la perméabilité intrinsèque des BAP de cette étude.

La mesure de perméabilité apparente dépend fortement du taux de saturation moyen des échantillons car le taux d'humidité peut varier à l'intérieur de l'échantillon ce qui a une incidence directe sur les valeurs de perméabilité. Dans cette étude les échantillons ont fait l'objet d'un pré-conditionnement en l'occurrence un séchage jusqu'à masse constante à 80°C.

Les échantillons sont issus de trois éprouvettes 11x22 cm pour chaque type de BAP. Les éprouvettes sont sciées après 60 jours de conservation dans l'eau à $20\pm 2^\circ\text{C}$, les échantillons sont ensuite rectifiés en disques d'épaisseur de $(50\pm 0,5)$ mm. Les échantillons sont alors placés dans une étuve ventilée réglée à $(80\pm 1)^\circ\text{C}$, et séchés jusqu'à masse constante (deux pesées successives avec 24 h d'écart à l'étuve, ne diffèrent pas de plus de 0,05%). Une fois le séchage atteint, les échantillons sont placés dans un dessiccateur hermétiquement fermé 24 heures avant l'échéance de mesure, dans une pièce réglée à $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ et $(50\pm 5)\%$ d'humidité relative. Une dernière pesée est effectuée à la sortie du dessiccateur, avant l'essai, pour s'assurer de la stabilité de la masse [81]. Les faces latérales des tous les échantillons sont recouvertes d'un ruban d'aluminium autocollant pour assurer l'étanchéité latérale et par conséquent assurer le passage unidirectionnel du gaz.

Les échantillons sont placés un par un dans le porte échantillon préalablement enduit de graisse silicone, puis placé dans la cellule de perméabilité. Une chambre à air torique gonflée avec une pression moyenne de 8 bars comprime le porte échantillon et assure ainsi l'étanchéité latérale. Le tuyau d'admission de l'azote est connecté à la cellule, l'acquisition de débit et de pression est lancée et la pression est réglée à 3 bars. L'essai est réalisé dans une pièce dont l'atmosphère est réglée à $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ et $(50\pm 5)\%$ d'humidité relative. Le dispositif d'essai représenté sur la figure II.18 est complété par un thermomètre et un baromètre, qui permet de mesurer la pression à la sortie de la cellule.

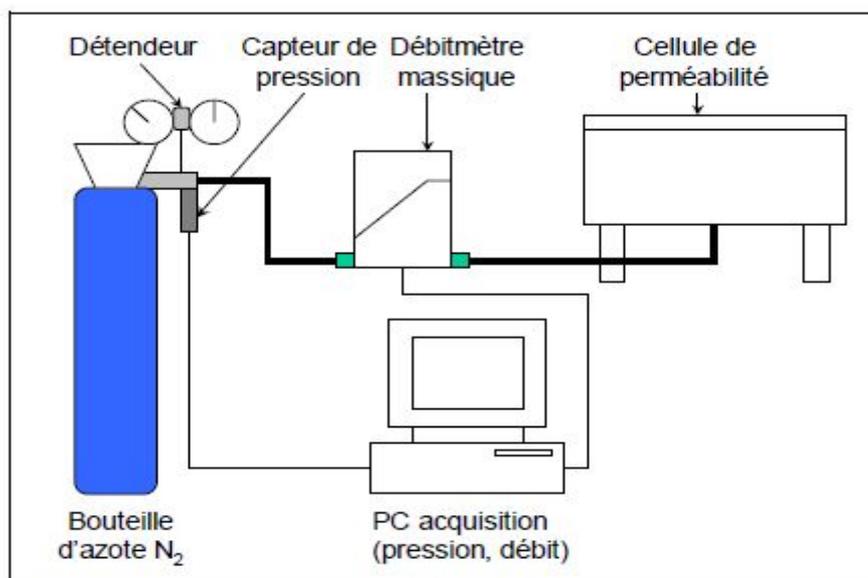


Figure II.18: Schéma de l'essai de perméabilité au gaz [81]

L'essai est réalisé par pressions décroissantes, à 3,0 - 2,0 et 1,0 bar. La pression d'injection est réglée au niveau du manomètre. Après stabilisation, la température extérieure à proximité de la cellule et la pression atmosphérique sont notées sur le fichier de saisie. La pression atmosphérique et la température sont relevées une nouvelle fois avant réglage de la pression suivante.

L'essai est assisté par ordinateur et à chaque pression la perméabilité apparente K_a est calculée à partir de la formule suivante :

$$K_a = \frac{Q_1 2 \mu L P_{atm}}{S (P_1^2 - P_{atm}^2)} \quad (26)$$

Avec :

- Q_1 : débit volumique à l'entrée (m^3/s)
- μ : viscosité dynamique de l'azote (Pa.s)
- P_1 : pression d'injection (Pa)
- P_{atm} : pression atmosphérique (Pa)
- L : épaisseur de l'échantillon (m)
- S : section de l'échantillon (m^2).

Ainsi, on peut déduire la perméabilité intrinsèque K_i selon l'approche de Klinkenberg (1941) par la relation :

$$K_a = K_v \left(1 + \frac{\beta}{P_m}\right) \quad (27)$$

Avec :

- P_m : Pression moyenne, égale à $(P_1 + P_{atm})/2$
- β : Coefficient de Klinkenberg.

Le coefficient β est fonction de la finesse du réseau poreux et de la nature du gaz. La perméabilité intrinsèque K_i est la valeur limite de la perméabilité apparente lorsque que la pression moyenne du fluide tend vers l'infini, c'est-à-dire lorsque que le gaz tend vers une phase condensée (liquide). K_i est déterminé à partir d'une régression linéaire des différentes mesures de perméabilité apparentes effectuées pour différentes pressions d'injection selon l'inverse de la pression moyenne.

II.10 Diffusion des chlorures

L'exposition du béton aux chlorures a deux origines principales : l'eau de mer et les sels de déverglaçage. Chacun de ces environnements agressifs peut se décliner en différentes conditions d'exposition, selon les autres caractéristiques du béton et de l'environnement : taux de saturation, concentration en chlorures, température. Ces différentes conditions d'exposition aux chlorures ont pour conséquence commune la corrosion des armatures du béton armé. En effet, à partir d'une concentration limite en chlorures de la solution interstitielle du béton, souvent exprimée comme un rapport entre la concentration en ions chlorures Cl^- et hydroxyde OH^- , l'acier n'est plus passivé et la corrosion des armatures peut débuter [81].

Ainsi la durée de vie des ouvrages exposés au risque de corrosion des armatures dû à la pénétration des chlorures est souvent évaluée comme la période d'incubation, c'est-à-dire la durée au bout de laquelle la concentration critique en agents agressifs est atteinte au niveau du premier lit d'armatures. En plus des sollicitations mécaniques et de l'état de fissuration induit, la durabilité de la structure est donc fortement dépendante des propriétés du béton d'enrobage et de son aptitude à empêcher la pénétration d'agents agressifs tels que les ions chlorures. Dans cette étude, la connaissance précise des conditions d'exposition, en termes de conditions aux limites n'est pas prise en compte mais il est nécessaire d'explicitier son importance.

La pénétration des chlorures dans le béton est régit par deux mécanismes :

- L'absorption capillaire se produit lorsque le béton sec ou partiellement saturé est imbibé par la solution saline.
- La diffusion résulte d'un gradient de concentration en chlorures de la solution porale entre la surface exposée et le cœur sain, elle se produit en milieu saturé. Dans le cas de cycles d'humidification et séchage,

Les deux mécanismes peuvent coexister. Cela concerne par exemple les zones de marnage des ouvrages partiellement immergés.

La diffusion naturelle dans le béton étant généralement trop lente pour la qualification des compositions, de nombreux modes opératoires ont pour but de l'accélérer, notamment en imposant un champ électrique, on parle alors de migration.

En effet, les essais de diffusion simple durent généralement plusieurs mois, ce qui limite souvent leur domaine d'application par rapport aux essais accélérés. Le moyen le plus

couramment utilisé pour accélérer la pénétration des chlorures est la migration sous champ électrique. La migration désigne le transport des ions sous l'influence d'un champ électrique unidirectionnel permettant l'utilisation relation de Nernst-Planck. La figure II.19 illustre le principe et le montage de cet essai.

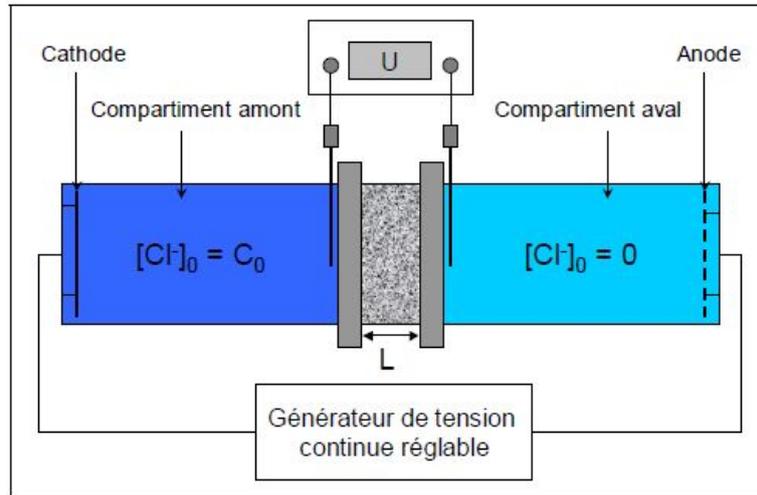


Figure II.19: Schéma de l'essai de migration des Chlorures [81]

Dans cette étude, la méthode en régime permanent (ou dit stationnaire) mis en place au GeM par Bonnet en 2005 et Djerbi en 2007 a été adoptée, ce qui donne accès à un coefficient de diffusion effectif D_{eff} pour chacun des BAP d'étude, où les coefficients de diffusion effectif D_{eff} sont obtenus par un essai de migration sous l'effet d'une différence de potentiel électrique comme le décrit la norme XP P18-461.

Après fixation sur la cellule de migration, les compartiments amont et aval sont remplis des solutions (figure II.20). L'anode et la cathode sont reliées au générateur, et la tension est réglée manuellement afin d'obtenir une tension de $(12 \pm 0,2)$ V au entre les sondes situées au niveau des faces de l'échantillon. Chaque cellule est munie d'une alimentation séparée.

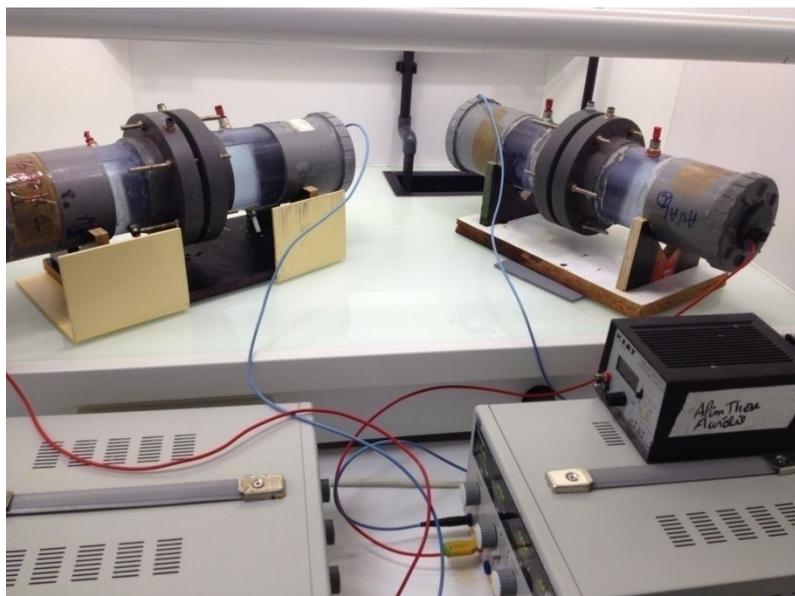


Figure II.20: Cellules de migration des chlorures

La solution aval est renouvelée toutes les 24 ou 48 heures, et la solution amont tous les 7 jours, afin de maintenir les conditions aux limites constantes. 500 ml de chaque solution sont prélevés lors des renouvellements, et conservés dans des flacons en PEHD. Le dosage des solutions aval s'effectue sur des échantillons de 50 ml, par titrage automatique (Figure II.21), à l'aide d'une solution de nitrate d'argent de concentration 0,05 mol/L.

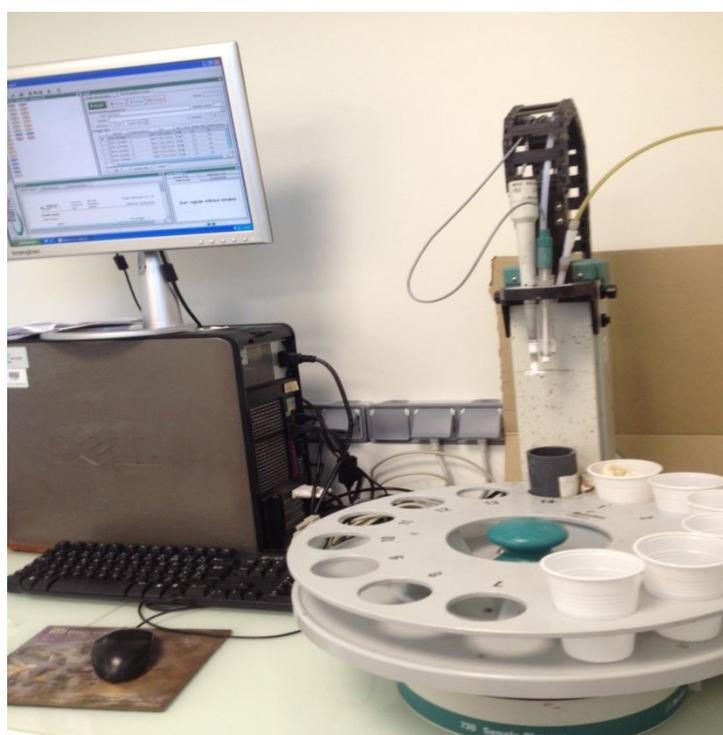


Figure II.21: Appareil de titrage potentiométrique

Le coefficient de diffusion dépend de plusieurs paramètres de calcul tels que F la constante de Faraday, R est la constante des gaz parfaits, la température T , γ le coefficient d'activité de l'ion en solution, La concentration C des ions, leur valence z et le potentiel électrique. Cependant, la littérature montre que pour le calcul du coefficient de diffusion effectif, il suffit de mesurer le flux d'ions chlorures dans le compartiment aval de la cellule pour en déduire le coefficient de diffusion. La valeur donnée est alors la valeur exacte. Si le champ électrique est suffisamment important pour pouvoir négliger la partie diffusion devant la migration, et donc, le coefficient de diffusion effectif est calculé selon la formule proposée par Andrade en 1993:

$$D_{eff} = \frac{RT}{z_{Cl} F} \frac{L}{U_e} \frac{J_{aval}}{C_{amont}} \quad (28)$$

II.11 Conclusion

Ce programme expérimental a pour objectif de comparer les performances physico-mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçants à base de liant incorporant différents pourcentage de la vase calcinée du barrage Chorfa II.

Nous avons adopté pour chaque BAP le même rapport Eau/Liant (Liant = C+K×A), le même squelette granulaire et le même volume de pâte.

Pour qualifier les performances des BAP de cette étude, de nombreux essais ont été présentés, certains sont liés au domaine physico-mécanique, comme les essais de résistance à la compression, d'autres concernent les propriétés de transfert et de durabilité.

Tous ces essais devraient permettre la détermination des propriétés révélatrices, directe ou indirecte, de l'influence de pourcentage de substitution en vase calcinée sur les performances des BAP et leur durabilité en vue d'optimisation de la formulation de BAP.

Chapitre I : Caractérisation de la vase et formulation du MBE

I.1 Introduction

Dans ce chapitre sont présentés les résultats de la caractérisation de la vase vis-à-vis de composition minéralogique, la pouzzolanicité et chaleur d'hydratation. Les essais de cette partie de l'étude sont réalisés sur matériaux brut, sur pâtes et sur coulis.

Une autre série de résultats est présentée aussi dans ce chapitre et qui concerne la formulation d'un mortier de béton équivalent (MBE). Cette étape a pour but la facilitation par la suite de l'adaptation de la formulation de BAP de cette étude à l'incorporation des différents pourcentages de vase calcinée en tant que substitut partiel du ciment.

I.2 Potentiel pouzzolanique de la vase Chorfa

I.2.1 Analyse DRX

La diffraction de rayons X (DRX) est l'une des techniques couramment utilisées pour l'identification des phases cristallisées contenues dans un matériau. Ce type d'analyse offre une identification minéralogique importante pour la classification des matériaux et pour la détermination du potentiel d'exploitation des matériaux en question. La DRX a été appliquée en premier lieu sur la vase brute. Le diagramme de diffraction des rayons X est présenté ci-dessous (figure I.1) :

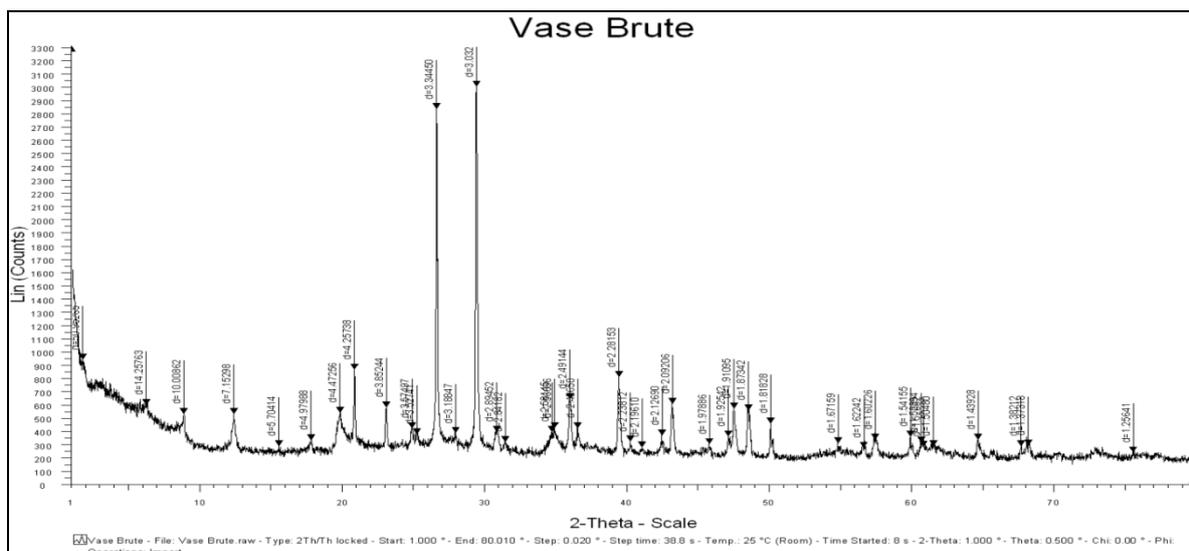


Figure I.1: Diffractogramme des rayons X de la vase Chorfa brute.

L'analyse par DRX de la vase brute montre l'existence de pics correspondants aux minéraux tels que : la kaolinite, la calcite, le quartz et la muscovite.

Le tableau I.1 regroupe la liste des principaux composés identifiés :

Tableau I.1: La liste des principaux composés identifiés de la vase brute.

Nom du composé	Formule chimique	Score	Facteur d'échelle
Kaolinite	$\text{Al}_2 \text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$	22	0,049
Calcite	$\text{Ca} (\text{CO}_3)$	79	0,982
Quartz	SiO_2	70	0,908

Dans cette étude nous nous intéresserons à la kaolinite, qui est l'élément essentiel du kaolin et la matière première des métakaolins artificiels. Il a été démontré dans la littérature que la thermo-activation de la kaolinite par calcination conduit à la production de métakaolin qui présente une activité pouzzolanique (c'est-à-dire qu'il réagit avec la chaux en présence d'eau). Le métakaolin est un composant présentant des potentialités pour être utilisé comme addition minérale dans les bétons en substitution partielle du ciment.

La calcination de la kaolinite en métakaolin peut être effectuée entre 600 et 800 °C. La température de calcination dépend du degré de pureté en kaolin et la calcination entraîne la déshydroxylation qui conduit à une destruction de la structure cristalline initiale de la kaolinite.

Le traitement des sédiments est donc indispensable notamment quand ces derniers sont destinés à être utilisés comme matériaux cimentaires. Dans cette étude le traitement s'est fait par calcination à 750 °C pendant 5 heures [63] ce qui a pour objectif l'élimination des résidus organiques et la transformation des structures argileuses stables en l'occurrence la kaolinite, en structures amorphes capables de réagir avec la chaux libérée par le ciment lors de son hydratation sous forme de portlandite [101]. En effet, la composition chimique et cristallographique de la vase du barrage Chorfa permet d'envisager ce type de transformation.

La figure I.2 montre le diagramme de diffraction des rayons X de la vase après calcination :

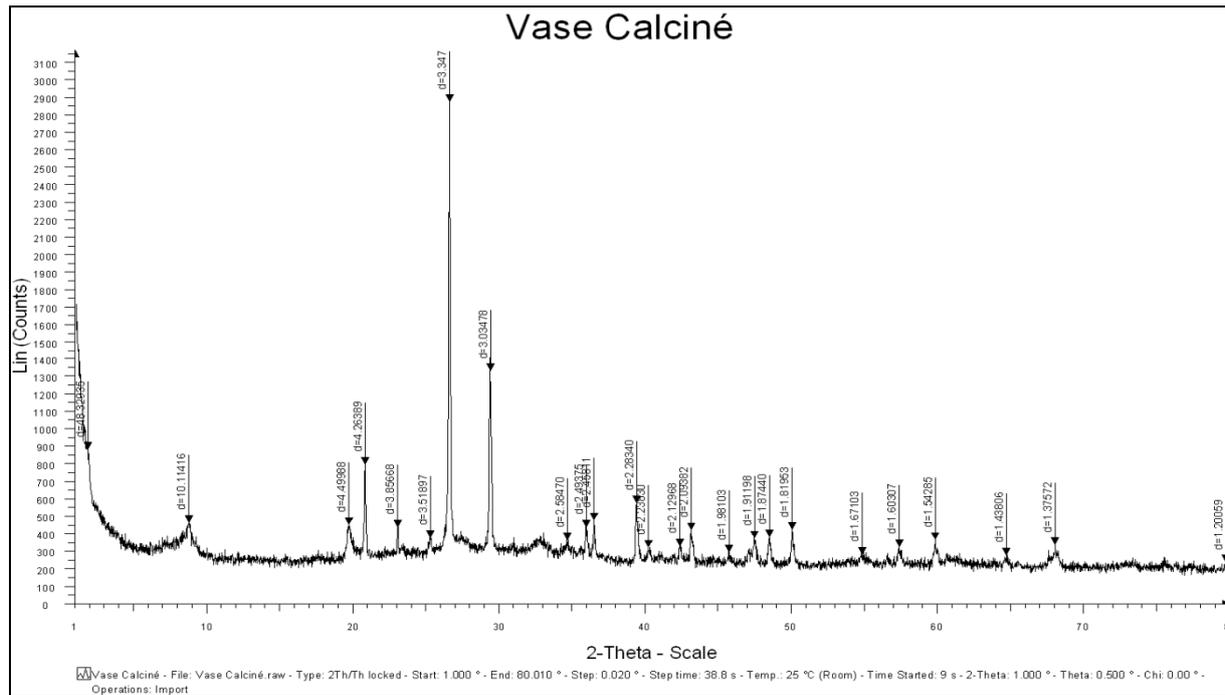


Figure I.2: Diffractogramme des rayons X de la vase Chorfa calcinée.

Le tableau I.2 regroupe la liste des principaux composés identifiés :

Tableau I.2: La liste des principaux composés identifiés de la vase Calcinée.

Nom du composé	Formule chimique	Score	Facteur d'échelle
Kaolinite	$\text{Al}_2 \text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$	9	0,014
Calcite	$\text{Ca} (\text{CO}_3)$	72	0,457
Quartz	SiO_2	72	0,778

La teneur en kaolinite dans la vase calcinée à 750°C est très faible par rapport à celle de la vase brute, ce qui confirme la formation du métakaolin, les proportions de la calcite et le quartz sont restés relativement inchangés.

Pour mieux constater les transformations subies par la vase après calcination, les deux diffractogrammes ont été superposés comme illustré dans la figure I.3.

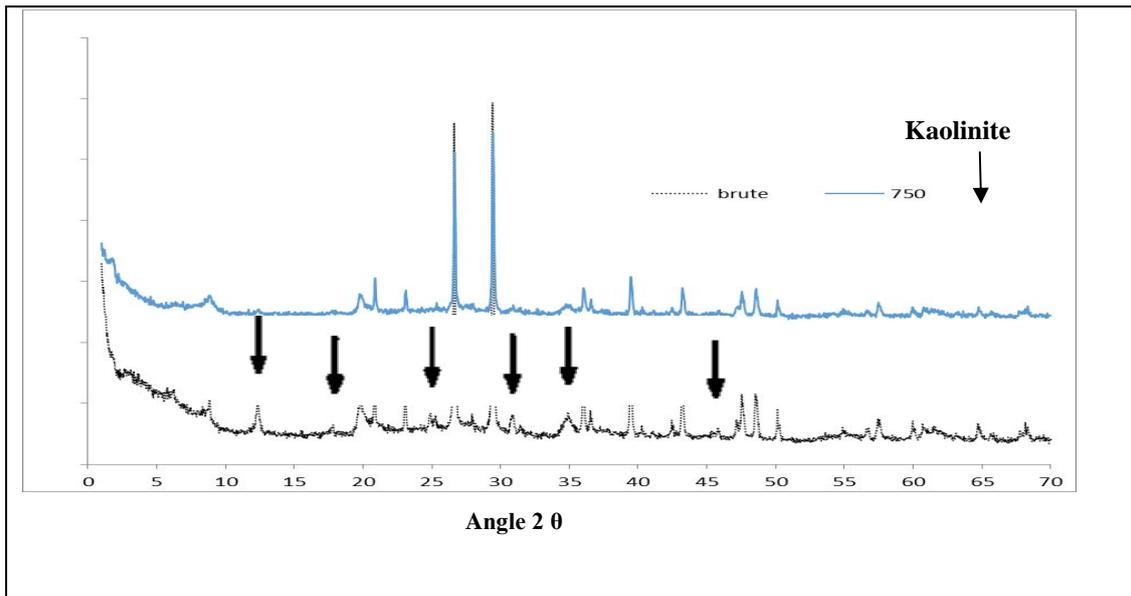


Figure I.3: Diffractogrammes des rayons X de la vase brute et la vase calcinée

La figure montre l'existence de pics correspondants à la kaolinite schématisés par des flèches noires sur le diffractogramme correspondant à la vase brute et la courbe DRX de la vase calcinée à 750 °C montre principalement la disparition des pics correspondants à la Kaolinite. Le faible degré de cristallinité du produit de cette calcination, en l'occurrence le métakaolin rend la silice et l'alumine potentiellement réactifs. L'activité pouzzolanique est liée à cette particularité. Donc la calcination à 750°C pendant 05 heures devrait nous assurer la réactivité pouzzolanique recherchée pour les pourcentages de substitutions envisagés.

I.2.2 Indice d'activité Pouzzolanique

L'activité pouzzolanique d'une addition minérale est souvent mesurée par un test de pouzzolanité au sens des normes EN 450 et NFP 18-506, où il s'agit de calculer un indice dit d'activité pouzzolanique. Cet indice est déterminé pour $E/C = 0,5$ et $p = 0,25$. Il est donc défini comme le rapport des résistances en compression $f_p(t)$ et $f_0(t)$, respectivement la résistance du mortier contenant une fraction p d'addition et la résistance du mortier témoin (sans addition).

La comptabilisation du substitut dans le liant équivalent pour le calcul du rapport $E/L_{\text{équi}}$, suit les règles normatives XP 18-305 et EN 206-1 où le liant équivalent est donné par l'équation (1):

$$L_{\text{équi}} = C + K \times A \quad (1)$$

Où **C** : masse du ciment, **K** : le coefficient d'activité (il est en fonction de **i**) et **A** : la masse du substitut utilisé.

Le coefficient **K** à son tour est déterminé par l'une des formules (2) ou (3) respectivement :

$$\mathbf{K} = 1 - [(1/P) \times [1 - 0.5 \times (E/C)]] \times (1-i) \quad (2)$$

$$\mathbf{K} = 3 \times i - 2 \quad (3)$$

Des prismes de 4x4x16 cm³ ont été confectionnés pour les deux liants équivalents, respectivement à base de vase calcinée et à base de ciment seul afin de mesurer les résistances en compression sur les demi-éprouvettes rompues par flexion à 90 jours. Le tableau I.3 illustre les valeurs de **i** et de **K**.

Tableau I.3: Valeurs de l'indice et du coefficient d'activité de la vase calcinée

		Compression (MPa)	Traction (MPa)
Mortier	Mortier 1 (MT)	58,13	12,91
	Mortier 2 (25% vase)	57,59	12,64
Indice d'activité	$i(p) = f_p(t) \div f_0(t)$	0,99	
Coefficient d'activité	K = 3 × i - 2	0,97	

L'indice d'activité de la vase calcinée est proche de 1, ceci est un signe d'une forte activité pouzzolanique.

I.2.3 Essai Chapelle Modifié

Pour étayer les résultats obtenus par les analyses DRX et le test de pouzzolanité par calcul de l'indice d'activité pouzzolanique, une série de tests Chapelle modifié ont été réalisés afin de mettre en évidence les propriétés pouzzolaniques de la vase calcinée. Ces tests visaient à mesurer approximativement la consommation de la chaux (Ca(OH)₂). A cet effet, les sédiments bruts et traités ont été respectivement mélangés à de la chaux aérienne et à de l'eau. Les mélanges ont été placés dans des flacons hermétiques à 20 ° C jusqu'aux échéances de passage à l'analyse thermogravimétrique (TGA). Les échantillons ont été chauffés dans des creusets d'oxyde d'aluminium jusqu'à 1050 ° C sous atmosphère d'azote et à une vitesse de chauffage de 5°C/min. Les courbes TGD résultantes sont présentées dans les figures suivantes :

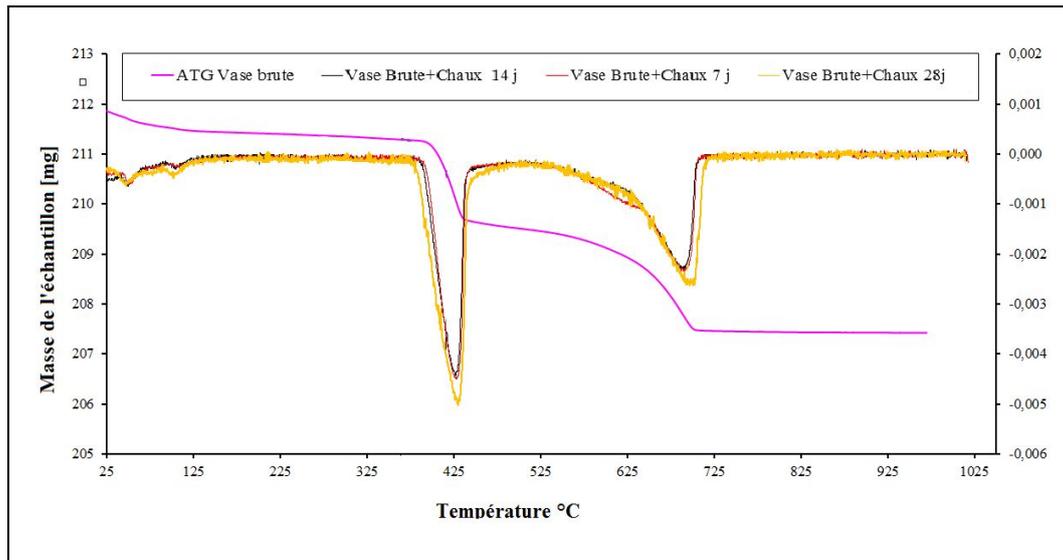


Figure I.4 :DTG des mélanges chaux et vase brute

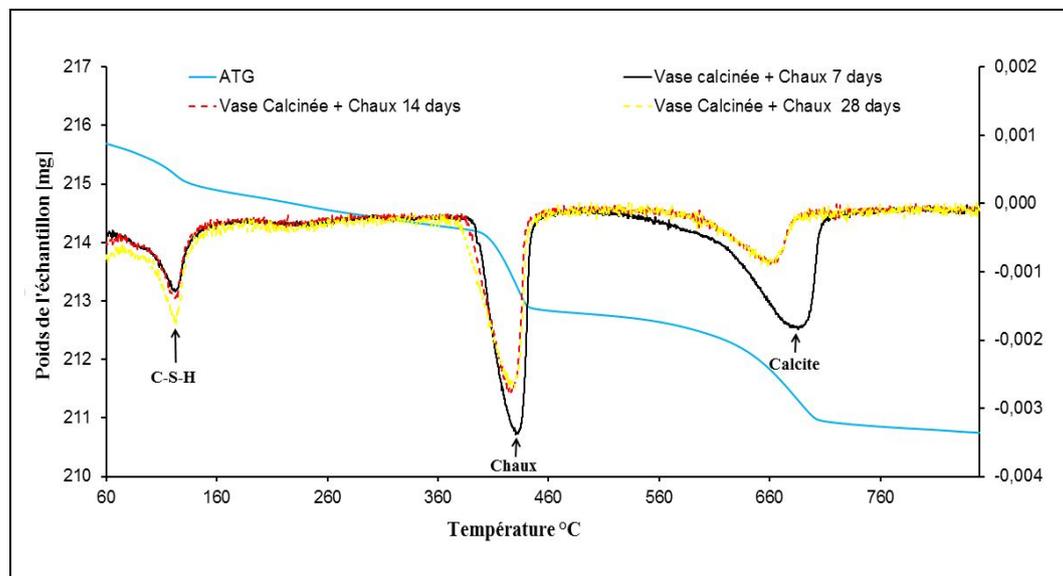


Figure I.5 : DTG des mélanges chaux et vase calcinée.

La figure I.4 montre les DTG d'une pâte à proportions égales de vase brute et de chaux aérienne et ce à différentes échéances à savoir 7, 14 et 28 jours. Où l'on voit que les trois courbes se confondent ce qui est signe d'aucune évolution dans le temps voir aucune réaction entre la vase brute et la chaux. Cependant, la figure I.5 montre clairement une évolution dans le temps de la réaction entre la vase calcinée et la chaux, cette évolution se traduit par la formation du pic correspondant aux C-S-H et la diminution des pics correspondants respectivement à la chaux et la calcite.

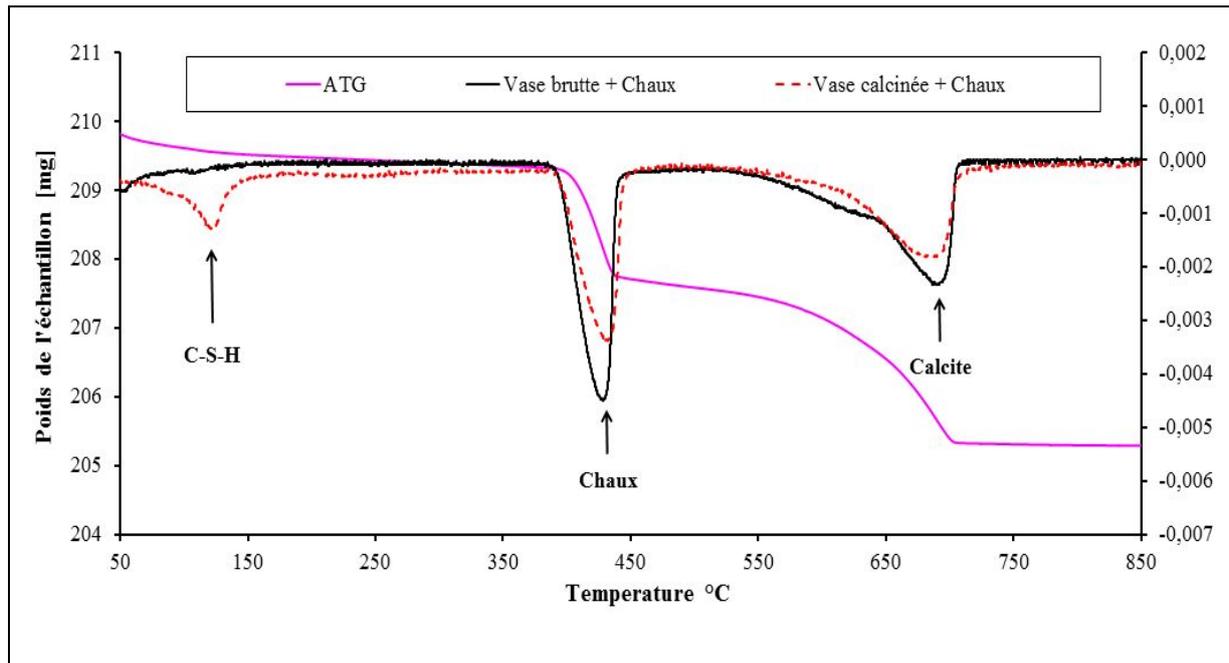


Figure I.6: DTG des mélanges chaux+ vase calcinée et chaux + vase brute

Comme on peut le voir sur la figure I.6, les deux mélanges ont deux comportements distincts. Ces différences sont principalement observées entre 70 et 150 °C ainsi qu'entre 400 et 450°C. Le pic entre 70 et 150°C pour le mélange avec des sédiments traités thermiquement correspond généralement à des produits d'hydratation de liaison, tels que le CSH. Le pic entre 400 et 450°C, qui correspond à la teneur en chaux, est plus faible pour le mélange à base de vase calcinée que pour le mélange à base de vase brute. Ces différences caractérisent l'effet pouzzolanique entre la chaux et la vase calcinée. Par conséquent, cette dernière peut être étudiée en tant qu'addition minérale entrant dans la composition de BAP.

I.2.4 Essai au microcalorimètre

L'hydratation des matériaux cimentaires est le résultat de la réaction chimique entre les composants anhydres du ciment et l'eau. Cette réaction est fortement influencée par la nature du ciment, sa teneur en sulfate, sa finesse, le rapport E/C, la température du milieu environnant, et la présence d'additions minérales et/ou d'adjuvants chimiques. Cette étape de l'étude menée dans ce travail présente l'effet de la vase calcinée et brute sur l'hydratation, plus précisément sur l'exothermicité de l'hydratation du ciment. La technique adoptée pour cet essai est celle du microcalorimètre.

Les figures I.7 et I.8 montrent l'évolution des flux thermiques et les chaleurs dégagées des pâtes confectionnées pour cet essai. Les pâtes ont la même consistance en l'occurrence la

consistance normale. Il s'agit de 7 mélanges : un mélange témoin à base de ciment, 3 mélanges à base de trois pourcentages de substitution à savoir 10, 20 et 30% de vase brute, les trois autres mélanges sont ceux avec les mêmes pourcentages de substitution mais en vase calcinée.

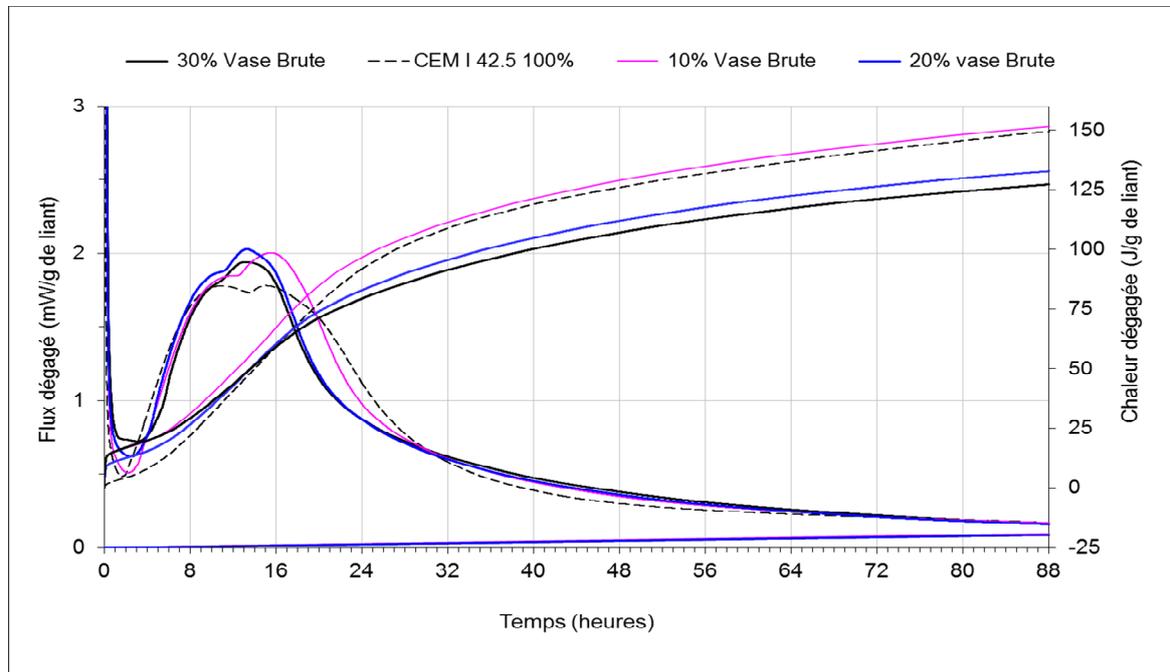


Figure I.7: Flux thermiques et chaleurs dégagées des pâtes à base de vase brute

D'après la figure on peut constater que les flux de chaleur des différentes pâtes suivent la même cinétique où on remarque des pics d'hydratation avant 10 heures et entre 10 heures et 18 heures environ, au-delà de ce temps, les flux de chaleur de toutes les pâtes commencent à diminuer et les réactions d'hydratation entrent dans la phase de décélération. Ensuite les réactions d'hydratations entrent dans la période de faible réactivité et le flux de chaleur diminue à un niveau bas.

Les pics principaux du flux de chaleur des pâtes à base de vase brute montrent des seuils légèrement plus élevés que celui de la pâte de ciment. Ceci pourrait s'expliquer par la surface spécifique de Blaine de la vase qui est plus importante que celle du ciment, de sorte que les particules de vase agissent comme des sites de nucléation pour les produits d'hydratation. De plus, la substitution du ciment dans les pâtes à base de vase, offre à la quantité du ciment restante une quantité d'eau additionnelle dans la solution interstitielle qui lui permet l'hydratation d'un nombre de grains plus important que celui d'une pâte de ciment en consistance normale.

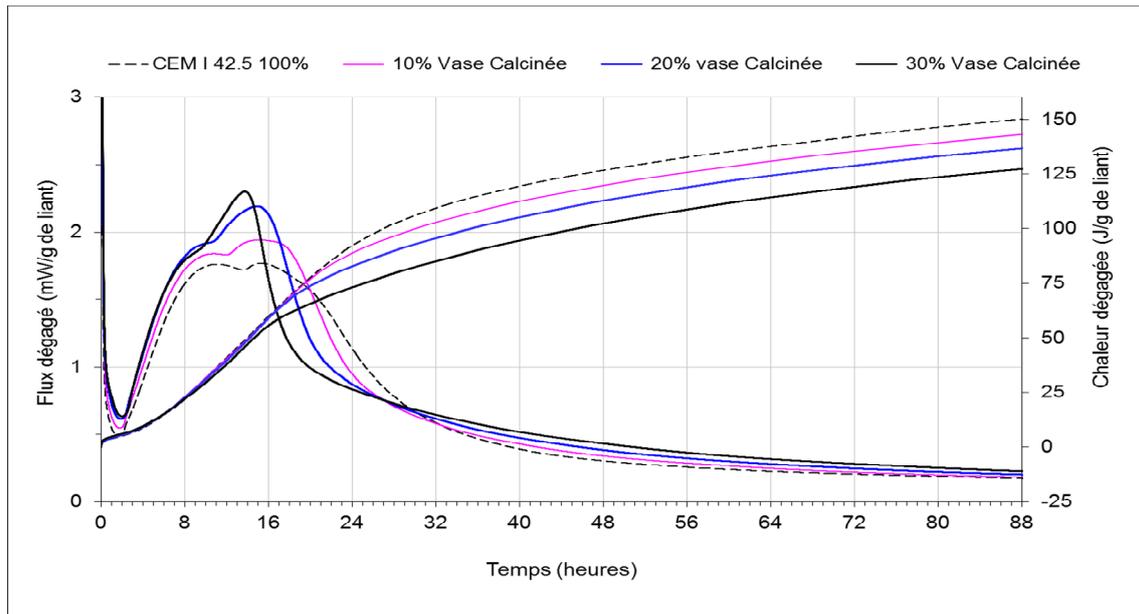


Figure I.8: Flux thermiques et chaleurs dégagées des pâtes à base de vase calcinée

Tout comme le cas des pâtes à base de vase brute on peut constater que les flux de chaleur des différentes pâtes suivent aussi la même cinétique où on remarque des pics d'hydratation avant 10 heures et entre 10 heures et 18 heures environ, au-delà de ce temps, les flux de chaleur de toutes les pâtes commencent à diminuer et les réactions d'hydratation entrent dans la phase de décélération. Ensuite les réactions d'hydratations entrent dans la période de faible réactivité et le flux de chaleur diminue à un niveau bas.

Par contre les pics principaux du flux de chaleur des pâtes à base de vase calcinée sont nettement plus importants que celui de la pâte de ciment. Ce qui pourrait s'expliquer par une deuxième réaction autre que l'hydratation du ciment qui survient en parallèle. En effet, nous avons déjà constaté l'effet de la surface spécifique de Blaine de la vase qui est plus importante que celle du ciment, de sorte que les particules de vase agissent comme des sites de nucléation pour les produits d'hydratation. Et aussi l'effet de la substitution du ciment dans les pâtes à base de vase qui offre à la quantité du ciment restante une quantité d'eau additionnelle dans la solution interstitielle qui lui permet l'hydratation d'un nombre de grains plus important que celui d'une pâte de ciment en consistance normale. Donc les flux additionnels constatés dans les pâtes à base de vase calcinée et qui sont proportionnels au pourcentage de substitution, ne peuvent s'expliquer que par la réaction pouzzolanique entre le métakaolin présent dans la vase calcinée et la chaux en présence de l'eau.

I.3 Essais sur coulis

Cette partie d'étude a été entamée dans un but de choisir un adjuvant pour les formulations de BAP. En effet, il a été constaté dans les sections précédentes que la vase étudiée présente une grande surface spécifique ce qui aura une incidence directe sur l'ouvrabilité. C'est pourquoi une série d'essais sur coulis a été élaborée afin de déterminer les dosages adéquats en adjuvants et le choix de ce dernier. Ce travail faciliterait par la suite les ajustements nécessaires des formulations de MBE et donc de BAP à l'incorporation de la vase.

Pour commencer cette partie de l'étude, il fallait mesurer la quantité d'eau nécessaire pour qu'une pâte de vase calcinée soit dans la consistance normale, c'est-à-dire déterminer le rapport E/C pour la consistance normale d'une pâte de ciment et une pâte de vase calcinée en utilisant l'appareil de Vicat comme le montre la figure I.9.



Figure I.9: Essais de consistance normale sur pâte de ciment et pâte de vase calcinée

Le tableau I.4 affiche les résultats des essais de consistance normale :

Tableau I.4: consistance normale pour pâte de ciment et pâte de vase calcinée

	Poids (g)	E/L	Consistance du mélange
Ciment	500	0.25	Normal
Eau (E)	125		
Vase (V)	500	0.45	Normal
Eau (E)	225		

Il est désormais évident que l'incorporation de la vase calcinée dans les mélanges à base de ciment entraîne une perte d'ouvrabilité à cause de sa grande demande en eau. A partir des valeurs issues des essais de consistance, des coulis ont été confectionnés à savoir : deux coulis de ciment témoins, deux coulis de ciment+15% de vase calcinée et deux coulis de ciment+30% de vase calcinée. Le deuxième paramètre qui change dans l'ensemble des coulis est le type d'adjuvant. En effet nous avons testé deux type d'adjuvants en l'occurrence le « *Viscocrete Tempo 12* » de la marque Sika et le « *Médaflow 113* » de la marque Granitex. Les deux sont des superplastifiants haut réducteurs d'eau.

I.3.1 Caractérisation des coulis au cône de Marsh et au mini-cône

Cette caractérisation s'articule sur la mesure du temps d'écoulement dans le cône de Marsh d'un coulis de ciment, et de mesurer le diamètre de la galette au mini-cône (étalement au mini-cône), en faisant varier le dosage de l'adjuvant et le pourcentage de substitution en vase calcinée.

Au début de cette démarche, un rapport $E/C = 0.35$ a été adopté pour la confection des coulis témoins puis le paramètre de masse du ciment C a été remplacé par la masse du liant équivalent L . Cependant, le rapport $E/L = 0.35$ n'a permis que la confection des coulis témoins car une fois la vase incorporée, nous avons atteint les dosages de saturation des deux adjuvants sans pour autant avoir des coulis. C'est pourquoi le rapport E/L a été révisé à chaque pourcentage de substitution.

Les formulations des différents coulis (un volume de 1 litre) sont regroupées dans le tableau I.5 :

Tableau I.5: Formulations des coulis testés

Composition Coulis	Ciment(g)	Vase(g)	Vase%	L'eau(g)	Sika%	Granitex%
coulis témoin 1 avec Tempo 12	1496	/	/	523.6 E/C=0.35	0.6	/
					0.8	/
					1	/
					1.2	/
					1.4	/
					1.6	/
coulis témoin 2 avec Médaflow 113	1496	/	/	523.6 E/C=0.35	/	0.6
					/	0.7
					/	0.8
					/	1
Coulis 3 15% Vase Avec Tempo 12	1271.5	189.4	15%	514 E/L=0.35	1.2	/
				555.2 E/L=0.38	1.7	/
				555.2 E/L=0.38	1.6	/
				555.2 E/L=0.38	1.8	/
Coulis 4 15% vase Médaflow 113	1271.5	189.4	15%	555.2 E/L=0.38	/	2
Coulis 5 30% vase Avec Tempo 12	1047.1	378.7	30%	631.6 E/L=0.44	1.6	/
					2	/
					2.4	/
Coulis 6 30% vase Médaflow 113	1047.1	378.7	30%	631.6 E/L=0.44	/	2

Les formulations des coulis ont été testées au cône de marche où des temps d'écoulements ont été enregistrés pour chaque coulis, puis au mini-cône où des galettes ont été mesurées.

Les figures suivantes montrent l'apparence des galettes formées au mini-cône :

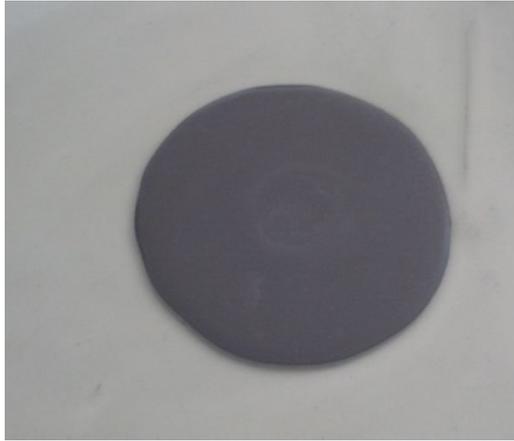


Figure I.10: Exemple de galette formée par un coulis témoin

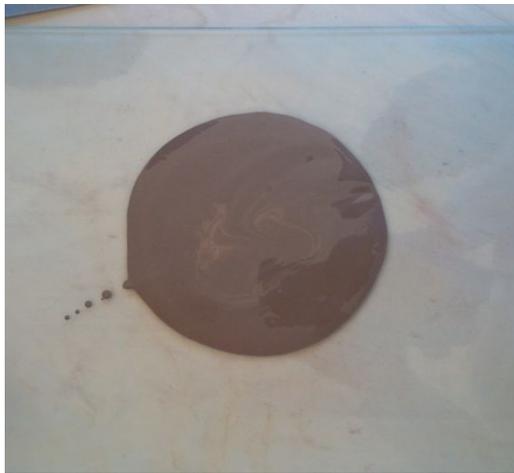


Figure I.11: Exemple de galette formée par un coulis de 15% de vase



Figure I.12: Exemple de galette formée par un coulis de 30% de vase

Les résultats de caractérisation au cône de Marsh et au mini-cône sont regroupés dans le tableau I.6 :

Tableau I.6: Récapitulatif des résultats de l'écoulement au cône de Marsh et l'étalement au mini-cône

		Temps d'écoulement pour (1000ml)	Etalement au mini-cône (cm)
Coulis N°1 témoin E/C=0.35	0.6% sika	1min39sec	16
	0.8 % sika	1min34sec	19
	1 % sika	1min30sec	19.5
	1.2 % sika	1min15sec	*
	1.4 % sika	1min14sec	*
	1.6 % sika	1min13sec	*
Coulis N°2 témoin E/C=0.35	0.6%gtanitex	1mn33sec	14.5
	0.7%granitex	1min29sec	15.5
	0.8%granitex	1min23sec	16
	1%granitex	1min19sec	18
Coulis N °3 15% vase	E/L = 0.38	1.2%sika	6min58sec
		1.7%sika	3min38sec
	E/L = 0.38	1.6%sika	1min43sec
		1.8%sika	1min39sec
Coulis N°4 15%vase E/L=0.38	2%granitex	1min52sec	15.8
Coulis N°5 20%vase E/L=0.44	1.6%sika	1min50sec	16
	2%sika	1min31sec	20
Coulis N°6 20%vase E/L=0.44	2%granitex	1min38sec	16

D'après les résultats de l'écoulement au cône de Marsh et l'étalement au mini-cône regroupé dans tableau III.5, on remarque que pour un rapport $E/C=0.35$ le dosage de saturation pour le coulis témoin est de 0.6% avec l'adjuvant « Sika tempo 12 » et 0.8% avec l'adjuvant « Granitex medaflow 113 », et pour 15% de vase les dosages des deux adjuvants augmentent respectivement à 1.6% et 2% à cause de la grande absorption de l'eau par la vase. Par la suite, les coulis à base de 30% requièrent un rapport $E/L = 0.44$, car il est impossible de confectionner un coulis de 30% de vase avec un rapport $E/L = 0.38$.

Donc comme constat préliminaire, l'adjuvant « Viscocrete Tempo 12 » offre plus d'efficacité pour compenser la perte de maniabilité due à l'utilisation de la vase.

I.4 Formulation du MBE

Dans cette partie de l'étude, nous avons tenté d'élaborer un Mortier de Béton Equivalent (MBE) à partir d'une formulation de BAP dite de référence élaborée par Bouhamou [8]. Le principe de cette démarche est de substituer la quantité du gravier contenu dans le BAP par un sable correcteur. Le MBE servira par la suite comme une base des propriétés d'ouvrabilité des BAP de cette étude et donc limiter les quantités de matériaux utilisés notamment dans les essais à l'état frais à chaque fois où il est question de changer un paramètre ou un ou plusieurs constituants de la formulation de référence.

Des essais d'identification sont à effectuer afin de pouvoir gérer le passage du BAP au MBE. Nous avons adopté l'essai d'étalement au cône pour les BAP et celui de l'étalement au mini-cône pour le MBE dans le but de trouver une corrélation entre les deux.

Tous ces essais devraient permettre néanmoins dans un premier temps, l'élaboration d'une formule de MBE représentative du comportement de son BAP de référence à l'état frais. Des essais de détermination des résistances mécaniques seront effectués pour enrichir ce travail et trouver éventuellement une corrélation à l'état durci.

Le sable correcteur utilisé est un mélange de sable de mer et de sable de carrière avec un coefficient d'équivalent de sable compris entre 70% et 80%, donc d'après la norme NAH 63 le sable est propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

I.4.1 Equivalence par les volumes des granulats

Le principe de cette méthode est de substituer le volume du gravier par un volume équivalent du sable correcteur. Les volumes des constituons de 1m³ du BAP de référence sont données par le tableau I.7:

Tableau I.7: Composition du BAP de référence

Les constituants	Volume en Litre
Ciment	145.16
Gravier 8/15	187.6
Gravier 3/8	125.2
Sable de carrière	82.1
Sable de mer	231.3
Eau	225

Nous allons dans un premier temps remplacer le volume des graviers par un volume d'un mélange de sable de carrière et de mer avec un rapport de $(S_m/S_c) = 1$, la première formulation de MBE (Les volumes des constituants de 1m³ de MBE) est donnée dans le tableau I.8 :

Tableau I.8: Composition du MBE N°1

Les constituants	Volume en litre
Ciment	145.16
Sable de carrière	320.31
Sable de mer	320.31
Eau	225

Cette formulation a fait l'objet de caractérisation au mini-cône à mortier, le résultat de cette caractérisation est montré sous forme de galette dans la figure I.13

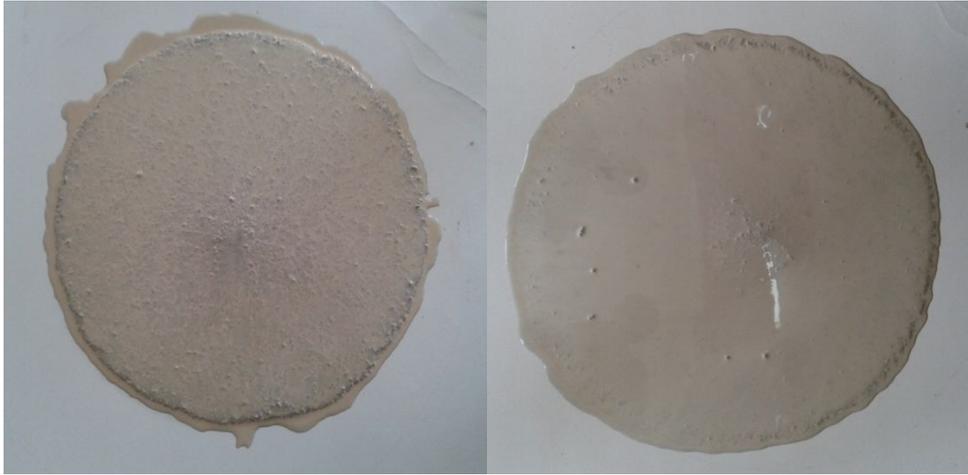


Figure I.13: Galettes MBE résultantes de l'équivalence par les volumes des granulats

Il est clairement observé depuis la figure I.13 que le MBE confectionné présente une faible homogénéité et le ressuage sur la galette formée est flagrant, ce qui est signe d'un mauvais mélange, par conséquent cette formule ne pourra pas être corrigée ce qui nous amène à écarter la première approche, celle de l'équivalence par les volumes, pour le remplacement de graviers par le sable correcteur.

C'est pourquoi une deuxième approche a été adoptée, celle de l'équivalence par les surfaces développées des granulats.

I.4.2 Equivalence par les surfaces des granulats

Le MBE que nous avons étudié est issue de la même formulation de BAP définie précédemment. Donc nous avons remplacé la quantité des graviers par un sable correcteur qui présente la même surface développée.

Nous avons choisi d'utiliser un mélange de sables lavés, sable de mer et sable de carrière d'origine calcaire, pour éviter tout artefact dû aux fines présentes dans le sable.

Les Tableaux suivants regroupent respectivement les valeurs de surfaces développées pour le gravier, le sable et le sable lavé.

Tableau I.9: Calcul des surfaces développées par le gravier 8/15

Opération	Symbole	Valeurs						
		3.15	4	5	8	10	12.5	16
Tranches Granulaires	T_{\min}	3.15	4	5	8	10	12.5	16
	T_{\max}	4	5	8	10	12.5	16	20
Masse de la tranche par kg de gravillon	M_i (kg)	0.0042	0.03	0.05	0.52	1.06	1.38	0.45
Volume de la particule moyenne	V_i 10^{-9} m^3	23.9	47.7	143.7	381.7	745.5	1515	3054
surface développée de la particule moyenne	S_i 10^{-6} m^2	40.15	63.62	133	254.5	398	638	1018
Volume massique de la matrice du granulat	μ_i $(10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})$	0.376						
Volume totale des particules moyennes	V_i 10^{-3} m^3	0.0016	0.011	0.019	0.196	0.399	0.519	0.170
Nombre particules moyennes	N_i	66.95	230.61	132	513.49	535.21	342.5 7	55.66
Surface développée Par les particules moyennes	S_i (m^2)	3 $\times 10^{-3}$	15 $\times 10^{-3}$	18 $\times 10^{-3}$	131 $\times 10^{-3}$	214 $\times 10^{-3}$	219 $\times 10^{-3}$	57 $\times 10^{-3}$
Surface développée Par 1kg de Gravillon	S_d (m^2)	188×10^{-3}						

Tableau I.10: Calcul des surfaces développées par le gravier 3/8

Opérations	Symbole	Valeurs					
Tranches Granulaires	T_{\min}	0	3.15	4	5	8	10
	T_{\max}	3.15	4	5	8	10	12.5
Masse de la tranche par kg de gravillon	M_i (kg)	0.05	0.26	0.38	1.22	0.08	0
Volume de la particule moyenne	V_i (10^{-9} m^3)	2.04	23.9	47.7	143.7	381.7	745.5
surface développée de la particule moyenne	S_i (10^{-6} m^2)	7.79	14.15	63.62	133	254.5	398
Volume massique de la matrice du granulat	μ_i $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$	0.376					
Volume totale des particules moyennes	V_i 10^{-3} m^3	0.02	0.10	0.14	0.46	0.03	0
Nombre particules moyennes	$N_i \times 10^4$	0.98	0.42	0.29	0.32	0.008	0
Surface développée par les particules moyennes	S_i (m^2)	0.08	0.06	0.18	0.43	0.02	0
Surface développée Par 1kg de Gravillon	S_d (m^2)	385×10^{-3}					

Tableau I.11: Calcul des surfaces développées par le sable de carrière

Opérations	Symbole	Valeurs							
Tranches Granulaires	Tmin Tmax	0 0.16	0.16 0.315	0.315 0.63	0.63 1.25	1.25 2	2 3.15	3.15 4	4 5
Masse de la tranche par kg de gravillon	Mi (kg)	0.045	0.12	0.16	0.26	0.21	0.16	0.02	0.003
Volume de la particule moyenne	V_i 10^{-9} m^3	0.0003	0.007	0.06	0.43	2.25	8.94	27.61	47.71
surface développée de la particule moyenne	S_i 10^{-6} m^2	0.02	0.18	0.70	2.78	8.30	20.83	40.15	63.62
Volume massique de la matrice du granulat	μ_i $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$	0.376							
Volume totale des particules moyennes	V_i 10^{-3} m^3	0.017	0.045	0.06	0.098	0.079	0.06	0.008	0.001
Nombre particules moyennes	Ni	5666×10^4	642×10^4	0.01×10^4	22.79×10^4	3.51×10^4	0.67×10^4	0.03×10^4	0.002×10^4
Surface développée par les particules moyennes	S_i (m^2)	1133.2×10^{-3}	1155.6×10^{-3}	0.07×10^{-3}	633.56×10^{-3}	291.33×10^{-3}	139.56×10^{-3}	12.05×10^{-3}	1.27×10^{-3}
Surface développée Par 1kg de Gravillon	Sd (m^2)	3366.64×10^{-3}							

Tableau I.12: Calcul des surfaces développées par le sable de mer

Opérations	Symbole	Valeurs					
		0	0.125	0.25	0.5	1	2
Tranches Granulaires	T_{\min}	0	0.125	0.25	0.5	1	2
	T_{\max}	0.125	0.25	0.5	1	2	4
Masse de la tranche par kg de gravillon	M_i (kg)	0.063	0.23	0.26	0.0008	0.0002	0.0002
Volume de la particule moyenne	V_i (10^{-9} m^3)	0.0001	0.003	0.028	0.52	1.77	4.71
surface développée de la particule moyenne	S_i (10^{-6} m^2)	0.01	0.11	0.44	1.77	7.07	28.26
Volume massique de la matrice du granulat	μ_i $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$	0.376					
Volume totale des particules moyennes	V_i 10^{-3} m^3	0.024	0.09	0.1	0.0003	0.0001	0.0001
Nombre particules moyennes	N_i	240×10^6	30×10^6	3.6×10^6	0.001×10^6	0.0001×10^6	0.0001×10^6
Surface développée Par les particules moyennes	S_i (m^2)	2.4	3.3	1.6	0.002	0.0007	0.003
Surface développée Par 1kg de Gravillon	S_d (m^2)	13.3					

Suite à la détermination des surfaces développées par l'ensemble des graviers entrants dans la composition du BAP de référence et les constituants du sable de correction, la deuxième formulation de MBE a été formulée selon le principe de l'équivalence des surfaces développée

La formulation du MBE établie selon l'équivalence par surfaces développées est donnée dans le tableau I.13 :

Tableau I.13: Formulation du MBE établit selon l'équivalence par surfaces développées

Les constituants	Les quantités (kg/m ³)
Ciment	450
Sable de carrière	235
Sable de mer	603
Eau	225
Superplastifiant	1%

Cette formulation a fait l'objet à son tour de caractérisation au mini-cône à mortier, le résultat de cette caractérisation est montré sous forme de galette d'étalement représentée dans la figure I.14 :



Figure I.14: Galette obtenue à partir de la formulation basée sur la méthode d'équivalence par les surfaces des granulats

La galette formée par le MBE de cette formulation est nettement meilleure que celle formée par le MBE de la première approche. Un léger ressuage est constaté sur le périmètre de la galette ce qui veut dire que la quantité de sable remplaçant les graviers n'a pas absorbé la totalité de la quantité d'eau que consommaient les graviers dans la formule BAP de référence, en essayant de comprendre ce phénomène, on s'est aperçu que la méthode de calcul d'équivalence entre les différentes surfaces des granulats n'est pas tout à fait fiable. Car outre la capacité d'absorption des graviers, la forme de ces derniers ; d'origine concassés ;

développent des surfaces nettement supérieures aux surfaces des sphères supposées correspondantes. D'où la nécessité d'introduire des coefficients de majoration dans le calcul des surfaces développées par les graviers. Ces coefficients de majorations vont être déterminés de telle sorte à avoir une quantité de sable remplaçante de façon efficace.

Nous avons commencé par prendre une quantité de 1Kg de Gravier, et calculé le nombre de grains présents, le nombre était 2 fois supérieur au nombre de grains calculé théoriquement.

Ensuite nous avons pris quelque grains de graviers aléatoirement, et nous avons mesuré les dimensions de chaque facette afin de calculer la surface réelle de chaque grain et la comparer à la surface de la sphère considérée théoriquement sur le tableau, et là aussi la différence n'est pas à négliger, elle est de l'ordre de 3, c-à-d que la surface réelle est trois fois supérieure à la surface de la sphère correspondante voir plus pour certains grains.

En prenant compte de ces nouvelles considérations, nous avons procédé par tâtonnement afin d'obtenir la quantité du sable correcteur qui absorberait la quantité d'eau destinée au préalable aux graviers. Ceci a abouti à la formulation suivante (Tableau I.14).

Tableau I.14: Formulation du MBE après correction empirique

Les constituants	Les quantités (kg/m³)
Ciment	450
Sable de carrière	500
Sable de mer	850
Eau	270
Superplastifiant	1%

Cette formulation a fait l'objet à son tour de caractérisation au mini-cône à mortier, le résultat de cette caractérisation est montré sous forme de galette d'étalement montrée dans la figure I.15 :



Figure I.15: Galette du MBE finale

Il est constaté sur la figure I.15 que la galette obtenue pour cette formule de MBE présente une homogénéité absolue, répartition uniforme des différents grains, et une absence totale de ressuage ainsi que la fluidité et l'écoulement étaient très satisfaisants.

Donc la deuxième méthode utilisée en l'occurrence celle de l'équivalence par la surface des granulats n'est pas tout à fait fiable et nécessite des corrections afin de répondre aux exigences de l'essai de l'étalement et pouvoir l'utiliser par la suite.

Maintenant que le MBE est formulé, il est indispensable d'établir une corrélation entre le comportement à l'état frais du MBE et celui du BAP de référence. A cet effet nous avons testé la sensibilité du MBE à la variation du dosage en superplastifiant et nous l'avons comparé à celle du BAP de référence en vue d'établir une corrélation.

Les dosages en superplastifiant adoptés pour cette étape sont : 0.7%, 1% et 1.3%. Les étalements observés (figure I.16) des trois BAP correspondants aux trois dosages en superplastifiant dépassent les 60 cm qui représentent la limite inférieure acceptable pour ce type d'essai ce qui implique que cette exigence a été convenablement remplie par les trois BAP en plus de la bonne répartition des granulats sur les galettes de béton. Cependant, les trois BAP présentent des ouvrabilités distinctes.



Figure I.16: Etalement des BAP avec respectivement 0.7%, 1% et 1.3% de Sp

On remarque d'après la figure que le BAP de référence commence à perdre sa bonne ouvrabilité à partir de dosage de 1% en superplastifiant. En effet, le ressuage observé sur le périmètre de la galette correspondante à 1.3% de superplastifiant est signe d'une perte d'ouvrabilité.

L'évolution de l'étalement du BAP de référence en fonction du dosage en superplastifiant est tracée dans la figure I.17 :

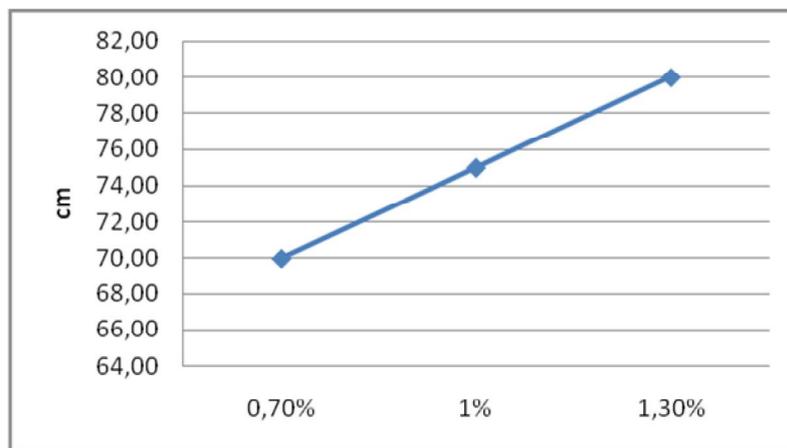


Figure I.17: Évolution de l'étalement du BAP en fonction du dosage en sp

Les mêmes dosages ont été appliqués au MBE et les étalements résultants sont présentés dans la figure I.18 :



Figure I.18: Etalement des MBE avec respectivement 0.7%, 1% et 1.3% de Sp

Même constat établi pour le comportement du MBE à la variation du dosage en superplastifiant, où on remarque d'après la figure que le MBE commence à perdre sa bonne ouvrabilité à partir de dosage de 1% en superplastifiant. En effet, le ressuage observé sur le périmètre de la galette correspondante à 1.3% de superplastifiant est signe d'une perte d'ouvrabilité.

L'évolution de l'étalement du MBE en fonction du dosage en superplastifiant est tracée dans la figure I.19 :

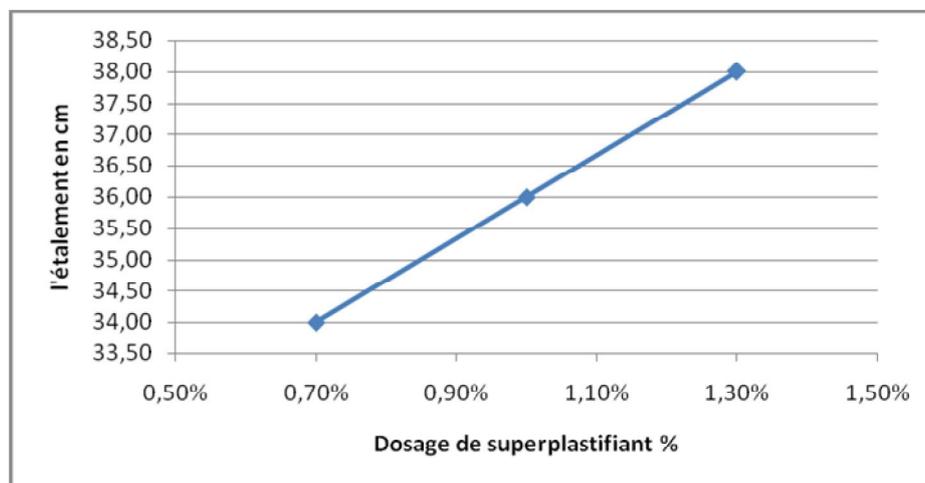


Figure I.19: Évolution de l'étalement du MBE en fonction du dosage en sp

Pour pouvoir établir la corrélation, il faut noter qu'un étalement de BAP de 60cm doit correspondre à un étalement de MBE de 30 cm.

En effet, Les valeurs d'étalement des trois MBE dépassent les 30 cm qui représentent la limite inférieure acceptable pour ce type d'essais.

Les étalements du MBE ont été tracés en fonction des étalements du BAP de référence pour les mêmes dosages en Sp et le graphique résultant est représenté dans la figure I.20.

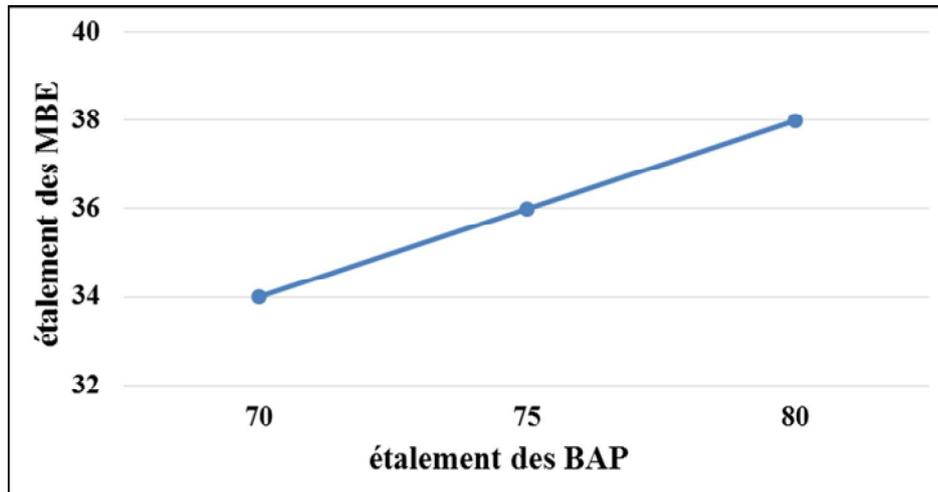


Figure I.20: L'étalement du MBE en fonction de l'étalement du BAP

La figure I.20 montre que la corrélation entre le MBE et le BAP de référence a été correctement établie, ce qui montre que le MBE formulé pourrait être considéré comme représentatif du BAP de référence et donc du comportement à l'état frais du BAP en question.

Cette corrélation entre le BAP et MBE équivalent peut être exprimée par la fonction $F(X) = 0,4 X + 6$ qui représente une ligne droite.

I.4.3 Performances mécaniques du MBE

Après avoir établi la corrélation entre MBE et BAP de référence vis-à-vis de l'ouvrabilité, nous avons tenté de vérifier la possibilité d'avoir une corrélation par rapport au comportement mécanique en l'occurrence la résistance à la compression.

Les résistances à la compression ont été obtenues par essai destructif d'une série de trois éprouvettes cylindrique de dimension (11×22) cm pour le BAP et d'éprouvettes prismatiques de dimension (4×4×16) cm³ pour le MBE soumises à l'écrasement à 28 jours d'âge et les résultats sont présentés sous forme de graphique (figure I.21 et figure I.22).

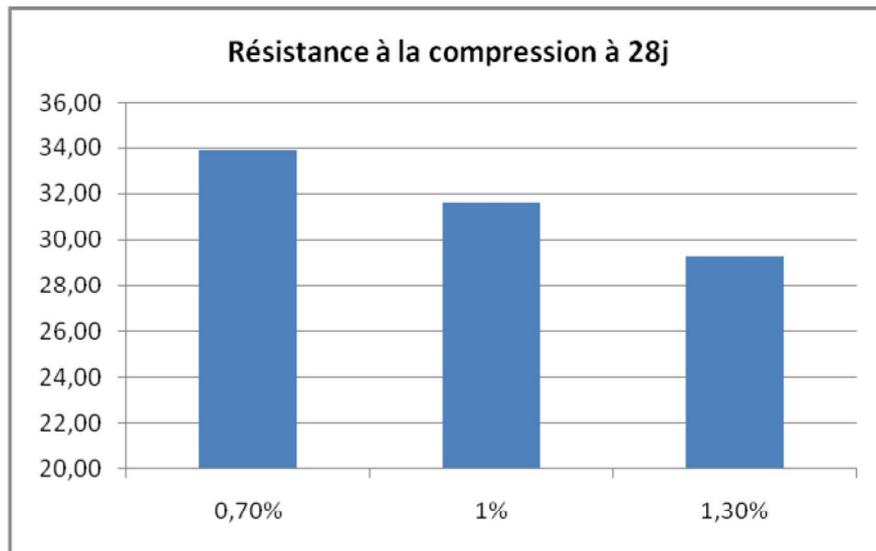


Figure I.21: Évolution de la résistance à la compression en MPa des MBE à 28j en fonction du dosage en Sp

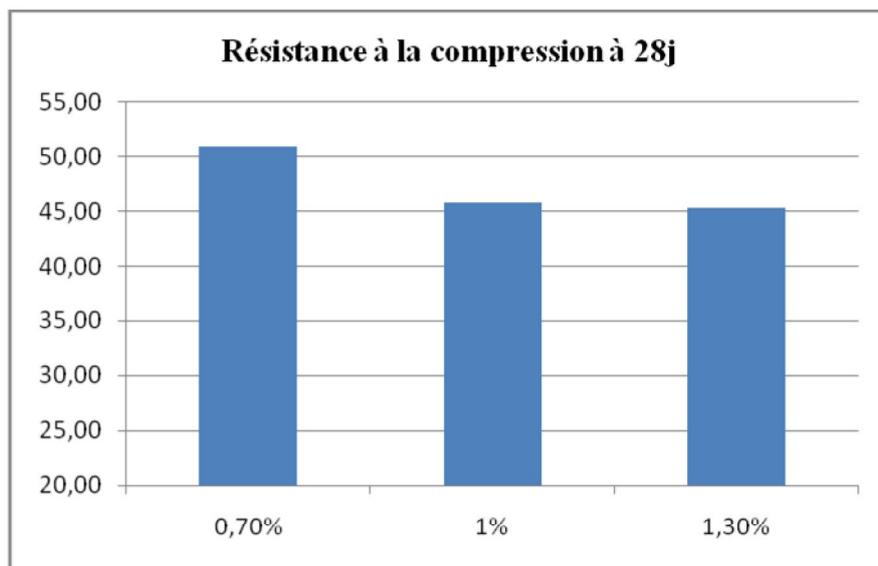


Figure I.22: Évolution de la résistance à la compression en MPa des BAP à 28j en fonction du dosage en Sp

Les résultats montrent que la résistance a tendance à diminuer en augmentant le dosage de superplastifiant, donc le surdosage en superplastifiant entraîne non seulement la perte d'ouvrabilité mais affecte aussi les résistances mécaniques aussi bien pour le BAP que pour le MBE. Par conséquent, si le critère de résistance est imposé, un dosage de 0.7% de superplastifiant peut être suffisant.

La figure I.23 présente les graphiques illustrant la corrélation entre MBE et BAP de référence vis-à-vis de la résistance à la compression.

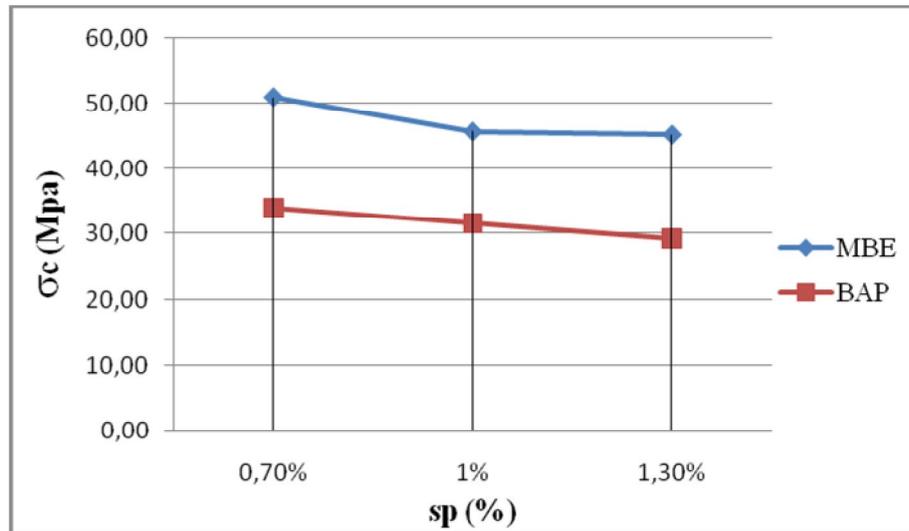


Figure I.23: Résistance à la compression du MBE et BAP à 28j en fonction du dosage en Sp

Les valeurs de résistances enregistrées pour les BAP et ceux enregistrées pour les MBE suivent la même cinétique même s'ils n'ont pas la même classe de résistance, ceci peut être expliqué par le fait que les résistances n'ont pas été mesurées sur le même type d'éprouvettes et donc pas la même presse d'écrasement.

Les valeurs de résistances des MBE ont été tracées en fonction de ceux enregistrés pour les BAP correspondants (figure I.24) :

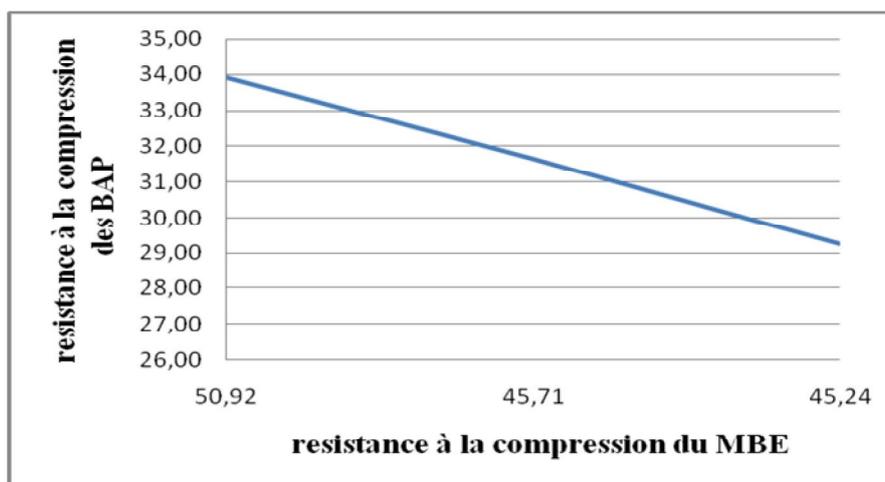


Figure I.24: Les résistances à la compression du MBE en fonction du BAP pour les mêmes dosages en Sp

La courbe de la figure I.24 montre que la corrélation entre le MBE et le BAP de référence par rapport aux résistances mécaniques existe et que les deux matériaux sont affectés de la même manière par la variation du dosage en superplastifiant, ce qui nous ramène à dire que le MBE formulé pourrait être considéré représentatif du BAP de référence à la fois pour le comportement à l'état frais et à l'état durci aussi.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu caractériser la vase calcinée du barrage chorfa par rapport aux propriétés pouzzolaniques, en effet l'analyse DRX a révélé la présence de kaolinite qui après calcination à 750 °C se transforme en métakaolin, ce dernier est connu pour ses vertus pouzzolanique depuis 1963. La pouzzolanité de la vase calcinée a été aussi vérifié par l'essai chapelle modifié basé sur des analyses thermogravimétriques des mélanges de chaux et de vase calcinée, et aussi par la détermination de l'indice d'activité pouzzolanique calculé par les valeurs de résistance à la compression des mortiers à base de vase contre des mortiers témoins.

Il a été démontré dans ce chapitre aussi que l'utilisation de la vase calcinée a une incidence directe sur la demande en eau des mélanges à base de vase ce qui affecte par conséquence l'ouvrabilité des mélanges en question.

Nous avons pu formuler dans ce chapitre un MBE correspondant au BAP de référence de cette étude ce qui va minimiser considérablement le nombre d'essais nécessaires à l'état frais pour l'ajustement de la formulation de BAP à l'incorporation des différents pourcentages de substitutions en vase calcinée.

Chapitre II : Caractérisation aux états frais et durci

II.1 Introduction

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

Concernant les résultats présentés dans ce chapitre caractérisant les propriétés mécaniques des bétons autoplaçants étudiés, il s'agit de suivi des résistances mécaniques en compression, le contrôle de ségrégation et un suivi du retrait.

II.2 Les formulations des BAP

Suite aux résultats du travail présenté dans le chapitre précédent, des formulations de BAP à base des pourcentages de substitution en vase calcinée ; en l'occurrence 10, 20 et 30% ; ont été élaborées en se basant sur les résultats donnés par les essais sur MBE.

Les formulations ont principalement le même volume de pâte (*eau efficace + air occlus + ciment + additions + adjuvant + fines des granulats de dimension inférieure à 80 μm*) qui est de 375 l/m^3 , le même rapport E/L = 0,5 et le même squelette granulaire avec un rapport G/S proche de 1.

Le dosage en adjuvant (*superplastifiant*) est ajusté afin de limiter la ségrégation et le ressuage et la perte de maniabilité et de résistance. Ce dosage est déterminé de manière expérimentale à partir d'essais sur MBE d'abord puis vérifié par les essais de caractérisation de BAP à l'état frais. Dans cette étude quatre bétons ont été formulés et les notations suivantes ont été adoptées:

- Un BAP témoin BAP-T.
- Trois BAP à base des trois pourcentages de substitution, ces BAP sont respectivement : BAP-V 10%, BAP-V 20% et BAP-V 30%.

Le tableau II.1 regroupe les 4 formulations finales de cette étude :

Tableau II.1: Compositions des quatre BAP.

Constituants Kg/m ³	Les BAPS			
	BAP -T	BAP-V 10%	BAP-V 20%	BAP-V 30%
Ciment	450	402	380	315
Eau	225	218,5	220	210
E/C	0,5	0,54	0,57	0,66
Superplastifiant	3,0	3,65	5,2	7,5
Vase calcinée	/	38,5	67	115
Gravier 3/8	330	330	330	330
Gravier 8/15	495	495	495	495
Sable de mer	245	245	245	245
Sable de carrière	570	570	570	570

Les différentes caractéristiques des quatre BAP sont illustrées dans le tableau II.2

Tableau II.2: Caractéristiques générales des quatre BAP.

Caractéristiques	BAP-T	BAP-V 10	BAP-V 20	BAP-V 30
E /L	0,5	0,5	0,5	0,5
Ajout/Ciment (%) En volume	0	10	20	30
Sp/Liant (%)	0,7	0,9	1,3	1,9
Volume de pâte (l/m ³)	375	375	375	375
Rapport G/S	1,01	1,01	1,01	1,01
SC /sable (%)	30	30	30	30
G (3/8) / gravillon (%)	40	40	40	40
Volume de squelette granulaire (l/m ³)	625	625	625	625
Masse volumique théorique (Kg/m ³)	2314,44	2307,4	2306,66	2306,26

II.3 Caractéristiques à l'état frais

Afin de valider les formulations de BAP, il faut que ces dernières possèdent les qualités préconisées pour ce type de béton, à savoir : la fluidité, la stabilité, l'aptitude au remplissage, la résistance à la ségrégation et la résistance au ressuage.

Le tableau II.3 regroupe l'ensemble des essais destinés pour une telle caractérisation :

Tableau II.3: Les essais de caractérisation des BAP à l'état frais.

Essais	Objet de l'essai	Volume	Matériel nécessaire	Valeurs limites
Étalement	Caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné.	5,3L	-Un cône d'Abrams -Une plaque métallique carrée > 90 cm -Un mètre -Un niveau à bulle -Un chronomètre.	$d = (60 \div 75) \text{ cm}$ $2 \text{ s} < T_{50} < 5 \text{ s}$ pour construction bâtiment
J-Ring	Tester la mobilité du béton en milieu confiné et vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes du phénomène de blocage inacceptables.	5,3L	-le même que celle de l'essai d'étalement, - en ajoutant un anneau équipé de barre en acier	$2hr - hm < 15 \text{ mm.}$ Tel que : $hm = \Sigma (h1 - hai) / 4$ $hr = \Sigma (hai - hri) / 4$
Essai de la boîte en L		12L	-Boîte en L -Un mètre -Un niveau à bulle -Un chronomètre.	$(h_2/h_1) * 100 > 80\%$
Stabilité au tamis	Qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation.	10L	-Seau de 10 litres -Un tamis de 5 mm -Un fond du tamis -Une balance -Un chronomètre	$\Pi = \frac{P_{\text{laitance}}}{P_{\text{échantillon}}} \times 100$ avec $P_{\text{laitance}} = P_t - P_{\text{fon}}$ $0 \leq \Pi \leq 15\%$
Essai de ressuage	Ségrégation, tassement	6,5L	-éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur	$q > 3 \%$

a) L'étalement au cône

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

L'auréole de laitance des compositions de BAP, à la périphérie des galettes de béton est 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.

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

La figure II.1 présente l'aspect des BAP lors de l'essai de l'étalement au cône.



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

b) La ségrégation dynamique

La ségrégation dynamique des BAP est caractérisée par l'essai de la boîte en L qui est exploité au travers du taux de remplissage (rapport des hauteurs de béton en fond et en début de boîte), il doit être supérieur à 0,8 [1]. Les 4 BAP vérifient cette condition.

Néanmoins les BAP-V, malgré son dosage élevé de superplastifiant, il présente un taux de remplissage légèrement que celui du BAP-T.

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



Figure II.2: Essai de la boîte en L

c) La ségrégation statique

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



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

d) La ségrégation due au phénomène de blocage

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

**Figure II.4: Aspect de l'essai J-Ring****e) Le 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.

L'essai consiste à mesurer la quantité de liquide surnageant, remonté à la surface des éprouvettes, au bout de 3 heures (Figure II.5).

**Figure II.5: Essai de ressuage.**

L'ensemble des résultats de la caractérisation à l'état frais sont regroupés dans le tableau II.4 :

Tableau II.4: récapitulatif des résultats de caractérisation à l'état frais

Essai \ Béton	Béton	BAP-T	BAP-V 10%	BAP-V 20%	BAP-V 30%
Étalement	Ø (cm)	69	68	66	64
	T ₅₀ (s)	2,8	2,8	2,64	3,08
La boîte en L	H ₂ /H ₁ %	93	92,6	89	89
	T ₂₀ (s)	1,25	1	1,5	1,3
	T ₄₀ (s)	2,5	2.1	2,8	2,48
Stabilité au tamis	%	6,15	5,8	5.2	5.1
Essai de J-Ring	Ø (cm)	62	59	58	57
	2h _r -h _m (mm)	8.9	8.1	7.5	7
Essai de ressuage	%	1,1	1,66	1,02	0,96

La figure II.6 illustre les résultats des principaux essais à l'état frais

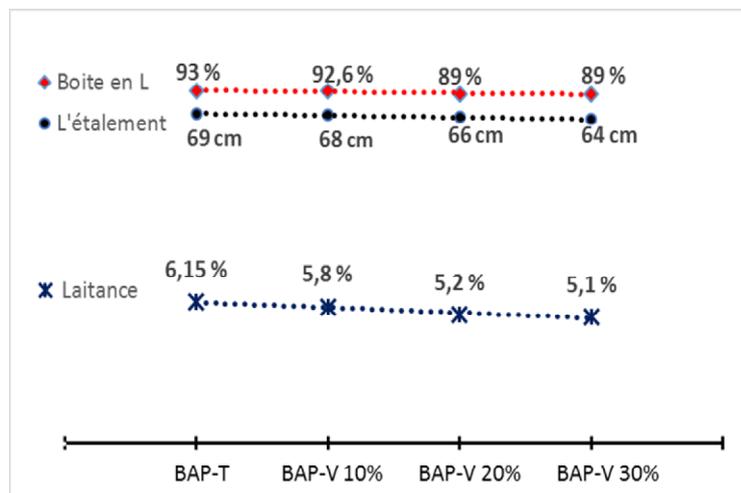


Figure II.6: Topo sur les résultats de caractérisation à l'état frais

Les 4 BAP vérifient l'ensemble des recommandations de l'AFGC [1] et donc sont qualifiés de bétons autoplaçants sachant que les BAP à base de vase nécessitent un dosage plus important en superplastifiant qui est directement proportionnel au pourcentage de substitution, et ce à cause de la grande finesse de la vase comparée à celle du ciment et éventuellement à

cause de la structure poreuse des grains comme observé précédemment à la figure 2 et donc à l'absorption d'eau qui en résulte si l'on se réfère à la famille des ajouts minéraux tels que les laitiers et la fumée de silice et qui ont une demande en eau importante par rapport à celle du ciment, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité des BAP. C'est pour ces mêmes raisons que le plus grand taux de substitution dans cette étude s'est limité à 30%.

II.4 Caractérisation à l'état durci

II.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. Le constat visuel de cet essai est donné par la figure II.7.

	Disque Sup	Disque Méd	Disque Inf
BAP-T			
BAP-V 10%			
BAP-V 20%			
BAP-V 30%			

Figure II.7: Observation de la répartition des granulats pour les 4 BAP

Ces photographies illustrent bien le fait que les 4 formulations de BAP présentées ici ne sont pas sujettes à la ségrégation statique. Les granulats sont en effet régulièrement répartis sur toute la hauteur des éprouvettes sciées.

II.4.2 Résistances à la compression

A l'instar des bétons classiques, la résistance à la compression est une caractéristique essentielle des BAP et l'un des paramètres fondamentaux de notre étude.

L'une des premières étapes de l'évaluation de l'impact de la substitution du ciment par les différents pourcentages de vase calcinée sur les propriétés mécaniques de la matrice cimentaire est la mesure de la résistance en compression des BAP contenant différents taux de substitution du ciment par la vase calcinée.

Cette grandeur est le premier paramètre requis pour qualifier un BAP et c'est même uniquement grâce à cette grandeur qu'on peut décider de la poursuite de cette étude. En effet, si un BAP ne satisfait pas le minimum exigé en terme résistance, il ne serait d'aucune utilité d'aller investiguer d'autres propriétés du même BAP. Les résultats présentés dans ce paragraphe découlent d'essais expérimentaux réalisés sur les différentes formulations de béton décrites en détail précédemment dans ce chapitre.

Les résistances mécaniques à la compression ont été mesurées à différentes échéances allant de 3 à 360 jours. Chacune des résistances représente la moyenne de trois valeurs issues d'une série de trois éprouvettes cubiques de dimension $(10 \times 10 \times 10)$ cm³ soumises à l'écrasement et les résultats sont présentés sous forme de graphique (figures II.8 et II.9).

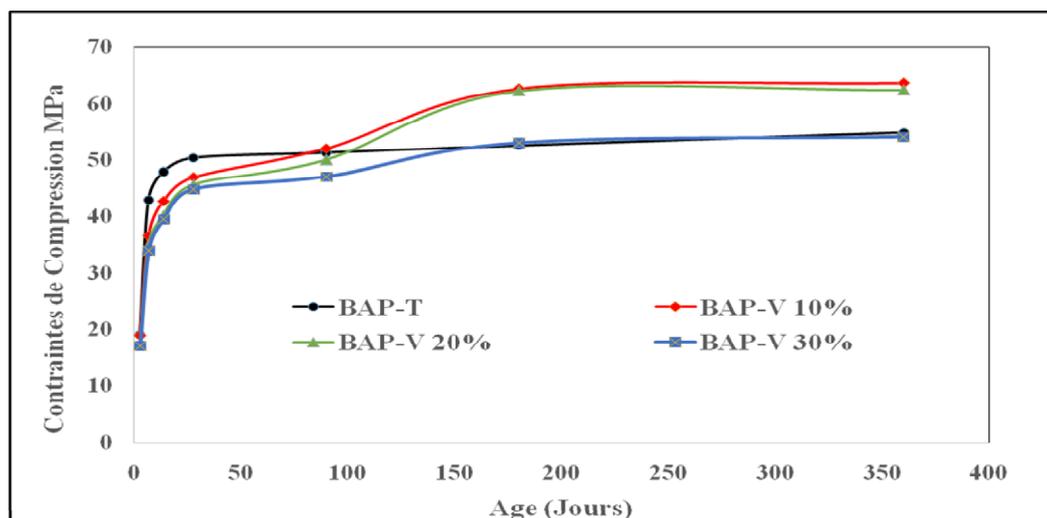


Figure II.8: Courbes d'évolution des résistances à la compression des BAP

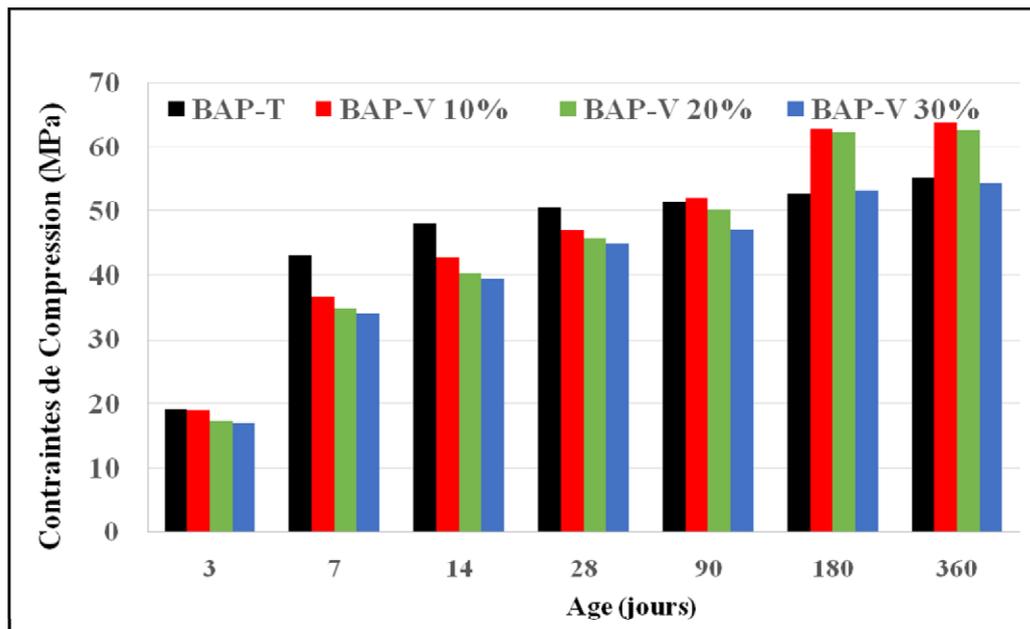


Figure II.9: Histogrammes de l'évolution des résistances mécaniques des BAP

Les résultats des résistances pour les différents BAP d'étude jusqu'à l'âge de 360 jours montre que les résistances enregistrées pour l'ensemble des BAP suivent la même cinétique avec un léger avantage pour le BAP témoin avant l'âge de 90 jours, cela peut s'expliquer par le phénomène de dilution causé par le remplacement partiel du ciment, où plus le taux de substitution est important, moins sont les hydrates formées. Toutefois le phénomène de dilution est souvent accompagné par l'effet de nucléation quand la finesse de l'ajout utilisé est supérieure à celle du ciment substitué. En effet il a été démontré que plus la finesse d'un ajout augmente plus l'effet physique de ses grains prend parti du processus d'hydratation où les hydrates prennent les particules de l'ajout comme site de nucléation ce qui catalyse l'hydratation des grains de ciment [100] [102]. Cet effet reste positif aux faibles taux de substitution notamment dans les cas d'ajouts à grande finesse, vu qu'au-delà d'une certaine limite, les proportions ciment/ajout sont beaucoup plus défavorisés par la dilution et l'excès des sites de nucléation ce qui influence négativement les performances mécaniques [103].

Au-delà de 90 jours les deux BAP, à base de 10 et 20% de vase calcinée respectivement, se distinguent en développant des résistances à la compression relativement supérieurs à celles des deux autres BAP. Cela peut être expliqué par l'effet pouzzolanique du métakaolin issu de la calcination [104] qui est qualifié dans certains cas comme étant une réaction tardive qui se manifeste au-delà de 90 jours, ce retard de réaction pourrait être justifié par le taux de portlandite qui s'avère insuffisant avant 90 jours pour que la réaction pouzzolanique soit

enclenchée. Le BAP à base de 30% de vase calcinée affiche des résistances similaires à celles du BAP de référence mais légèrement inférieures à celles des BAP à base de 10 et 20 % de vase calcinée, ceci s'explique par le fort effet de dilution engendré par le fort taux de substitution. En effet, moins de ciment implique non seulement moins d'hydrates mais aussi moins de portlandite et par conséquent moins de réaction pouzzolanique [103].

II.5 Le retrait

La mesure du retrait s'effectue sur éprouvette prismatique, de dimensions (7x7x28) cm³ pour les bétons, équipée de plots métalliques à chaque extrémité. L'éprouvette est placée verticalement entre les deux billes métalliques, qui permettent le suivi de sa longueur. Les mesures se font manuellement dès les premières heures.

Pour la mesure du retrait total, les extrémités des éprouvettes sont recouvertes d'une résine synthétique assurant l'étanchéité, ce qui veut dire que le séchage se fait uniquement sur les quatre faces latérales de chaque éprouvette. Pour la mesure du retrait endogène, les éprouvettes sont isolées de l'humidité ambiante par une double couche d'aluminium adhésif. Après fabrication, les éprouvettes sont conservées dans une salle à 20°C et 95% d'humidité relative. L'essai commence au bout de 24 heures d'âge dans la salle climatisée à 20±0,5°C et 50±5% d'humidité relative.

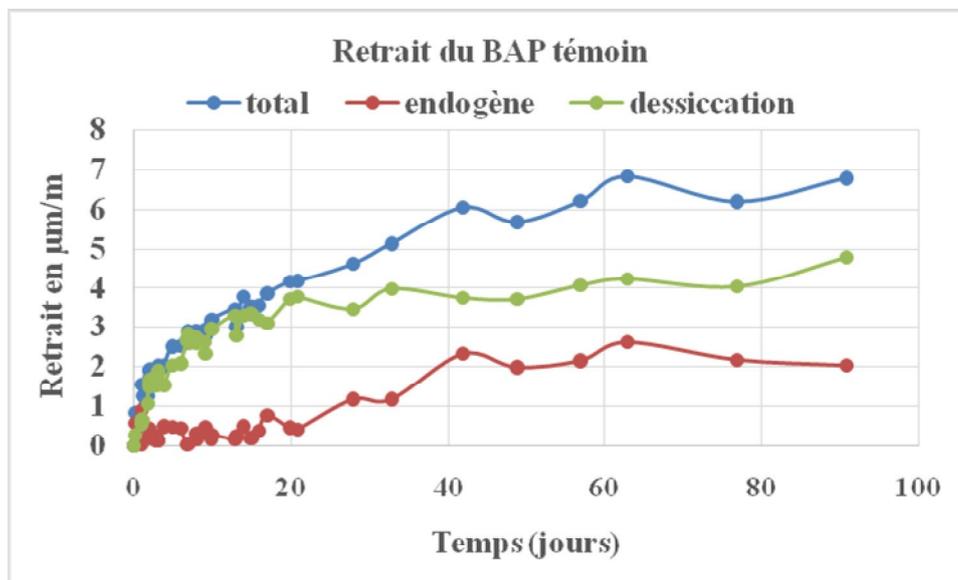


Figure II.10: évolution du retrait total, endogène et de dessiccation pour le BAP T

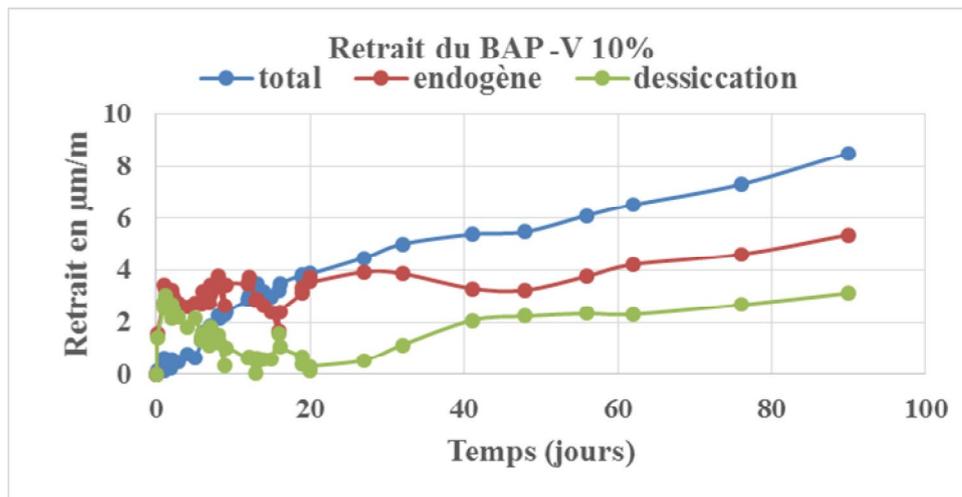


Figure II.11: évolution du retrait total, endogène et de dessiccation pour le BAP-V 10%

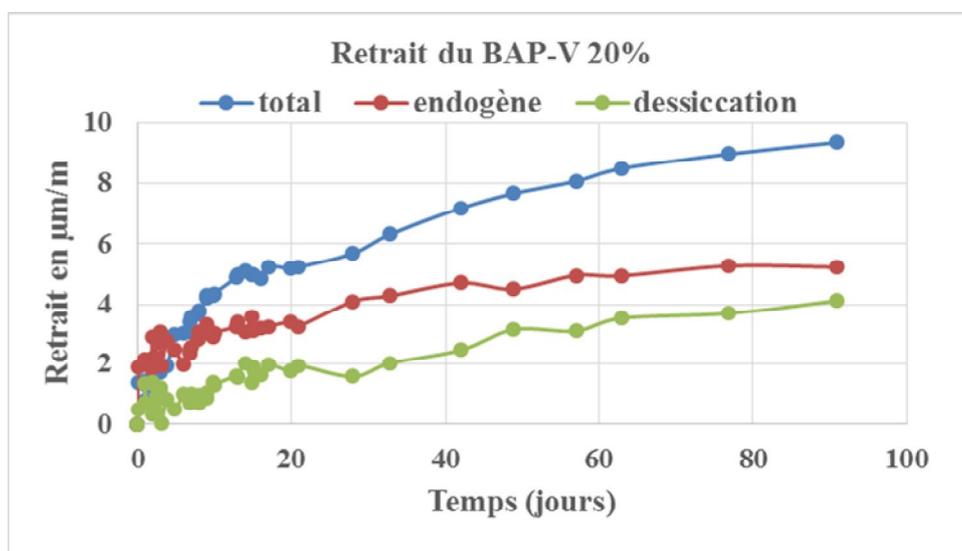


Figure II.12: évolution du retrait total, endogène et de dessiccation pour le BAP-V 20%

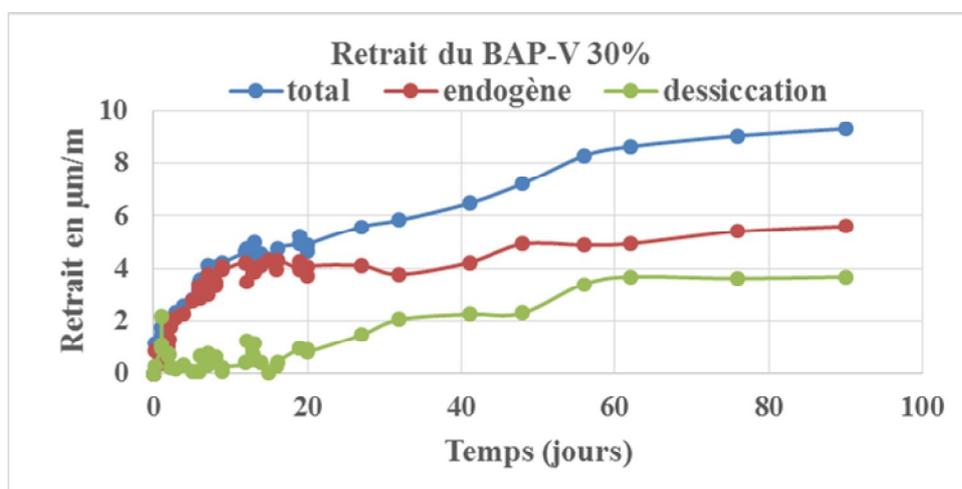


Figure II.13: évolution du retrait total, endogène et de dessiccation pour le BAP-V 30%

Les résultats de retrait enregistrés sur l'ensemble des éprouvettes semblent en cohérence parfaite avec le principe de mesure, en effet sur l'ensemble des éprouvettes on remarque que

Le retrait total est nettement supérieur au retrait endogène et par conséquent le retrait de dessiccation est entre les deux. Les différents BAP présentent dans l'ensemble un comportement satisfaisant vis-à-vis du retrait.

II.5.1 Le retrait total

Les évolutions du retrait total des BAP mesurés sur des éprouvettes (7x7x28) cm³ sont présentées sur la figure II.14.

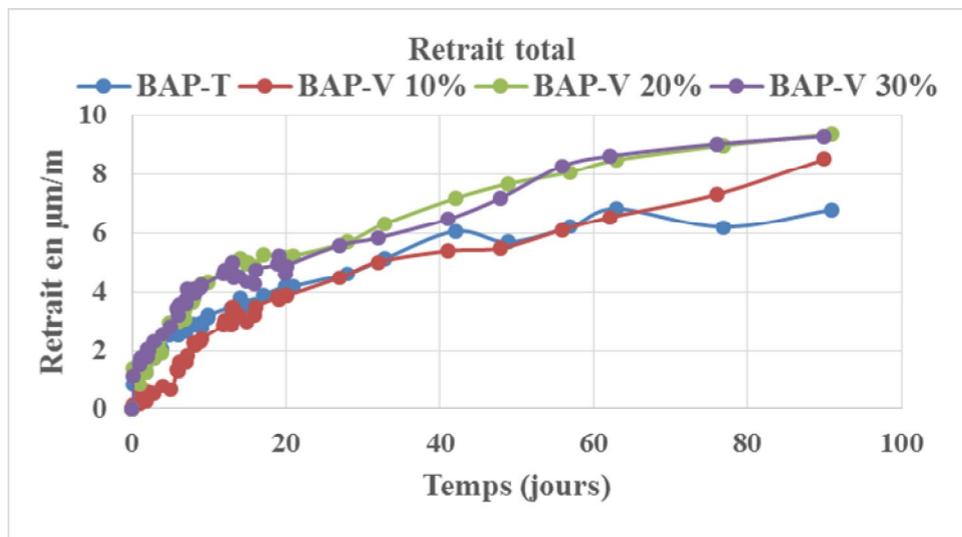


Figure II.14: Retrait total des quatre BAP en fonction du temps

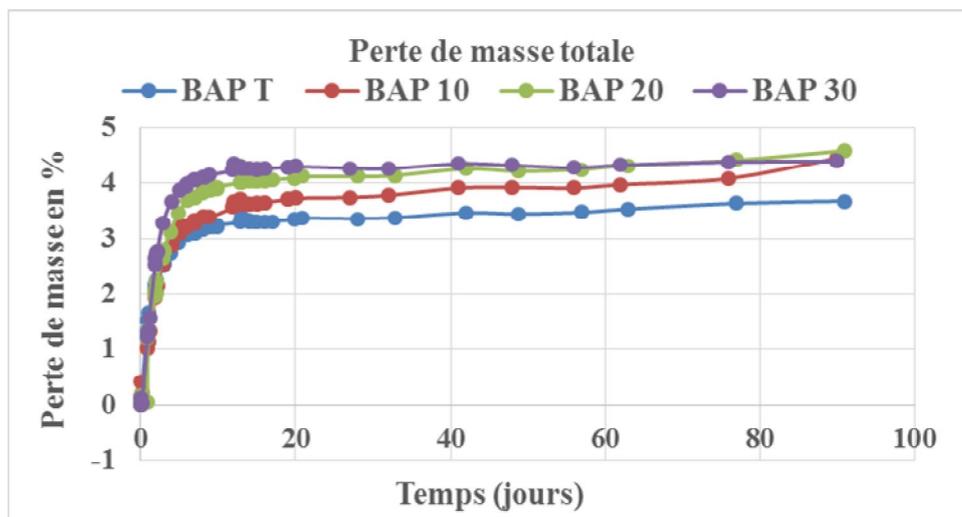


Figure II.15: Perte de masse totale des quatre BAP en fonction du temps

Le retrait total évolue très rapidement pour tous les types d'éprouvettes conservées à l'air libre, à cause de la taille de ces dernières qui rend la dessiccation plus favorable. Au jeune âge

Le retrait est presque indépendant de la composition du BAP, l'effet de l'ajout ne se manifeste qu'après la première semaine avec une légère supériorité pour les BAP de 20% et 30% de vase.

Si l'on considère le fait que les mesures se font à l'échelle du micromètre alors il est plus facile de dire que même à moyen et long terme la composition des BAP étudiés n'as pas d'influence considérable sur le retrait totale.

II.5.2 Le retrait endogène

Le retrait endogène est la déformation des éprouvettes isolées sans échange hydrique avec le milieu extérieur la figure II.16 présente les différents retraits endogènes enregistrés pour l'ensemble des BAP d'étude.

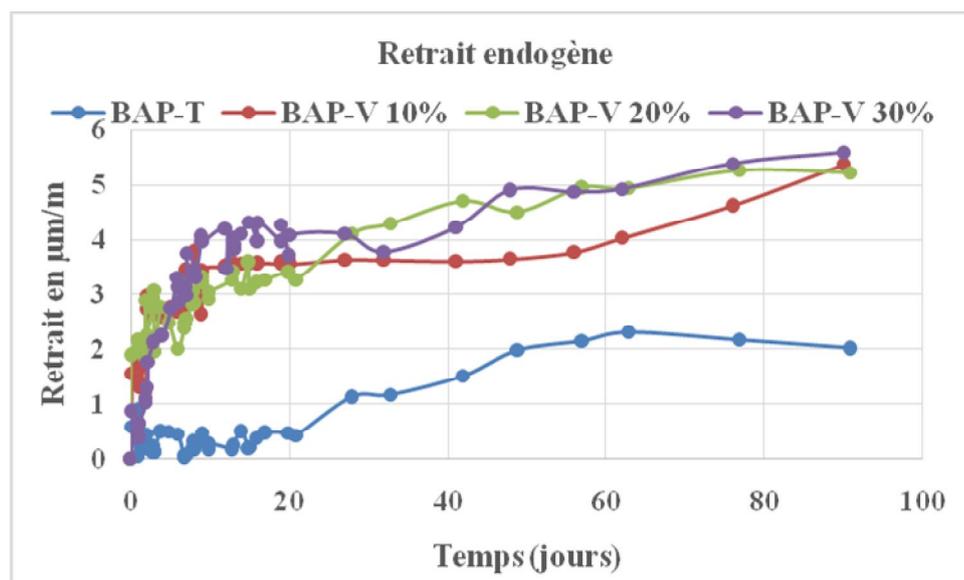


Figure II.16: Retrait endogène des quatre BAP en fonction du temps

Sur la figure III-40 sont présentés les résultats du retrait endogène pour les différents pourcentages de vase. Ces valeurs témoignent de l'évolution de l'hydratation et la dessiccation interne due à la consommation d'eau par le processus chimique de la formation des hydrates.

Le BAP T présente les déformations les plus faibles, dès les premiers jours et pour toute la durée des essais tandis que ceux à base de vase présentent des valeurs de retrait endogènes plus importantes et ce dès les premières heures.

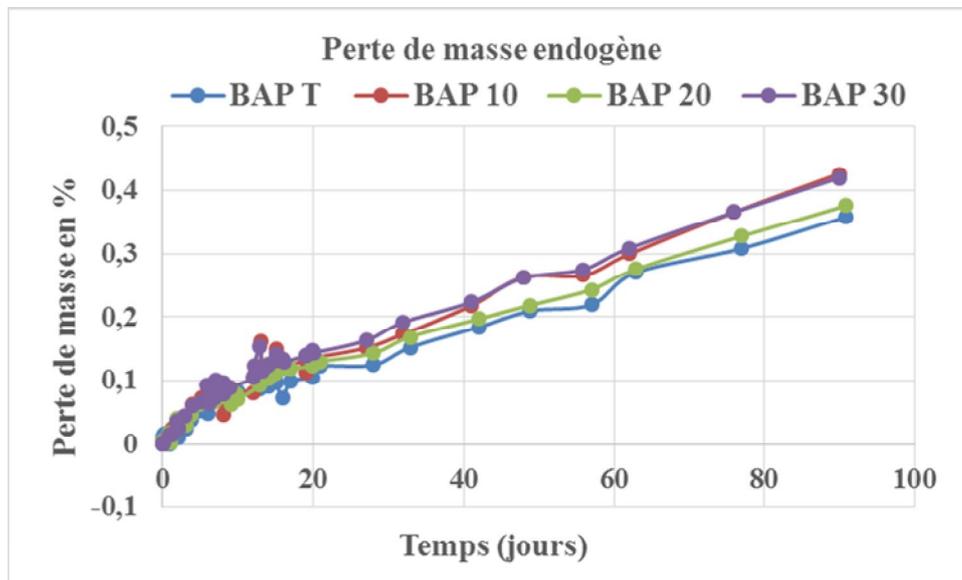


Figure II.17: Perte de masse endogène des quatre BAP en fonction du temps

Si l'on se base sur la définition du retrait endogène qui résulte du fait que le volume des hydrates formés est légèrement inférieur au volume des composants initiaux (eau + ciment). Ce processus entraîne une diminution de volume après la prise du béton, alors on peut clairement dire que les bétons contenant la vase calcinée nous révèlent la formation d'autres types d'hydrates autres que celle due à l'hydratation du ciment, en effet l'éventuelle réaction pouzzolanique de la vase calcinée peut bien en être la cause sans négligé l'effet physique de cette même vase suite à sa grande finesse qui conduirait à un effet de remplissage et donc une diminution des tailles de capillarité et donc favoriser les forces de traction capillaires internes.

II.5.3 Le retrait de dessiccation

La conséquence directe (réponse macroscopique) du séchage de matériau cimentaire est le retrait de séchage ou de dessiccation. Ce retrait de dessiccation dépend de l'état de l'eau inerte. Ainsi, les mécanismes de retrait sont à rechercher dans les liaisons de cette eau et le solide, qui dépend de l'humidité relative considérée.

Le retrait de dessiccation est mesuré par la différence entre les deux retraits : total et endogène. La figure II.18 présente le retrait de dessiccation des quatre BAP en fonction du temps.

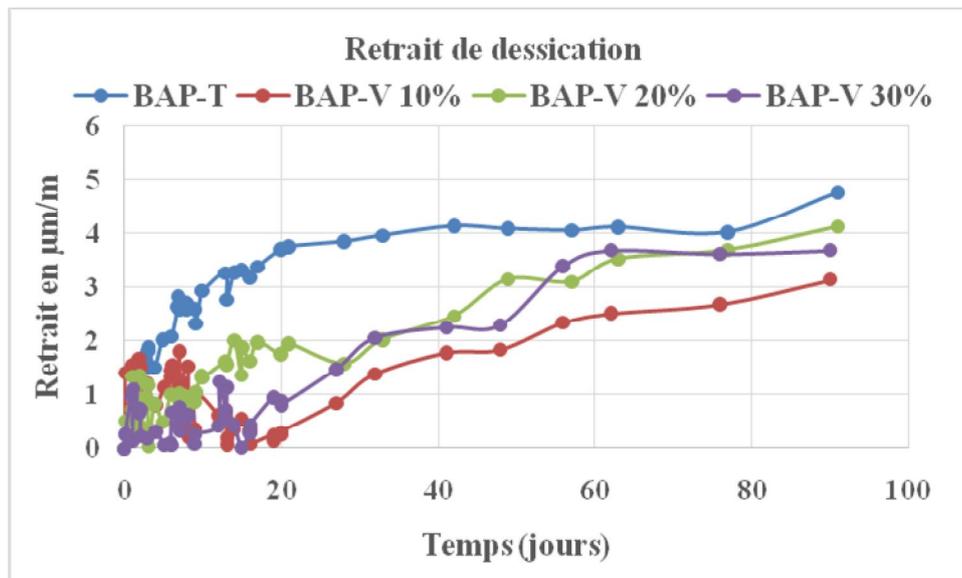


Figure II.18: Retrait de dessiccation des quatre BAP en fonction du temps

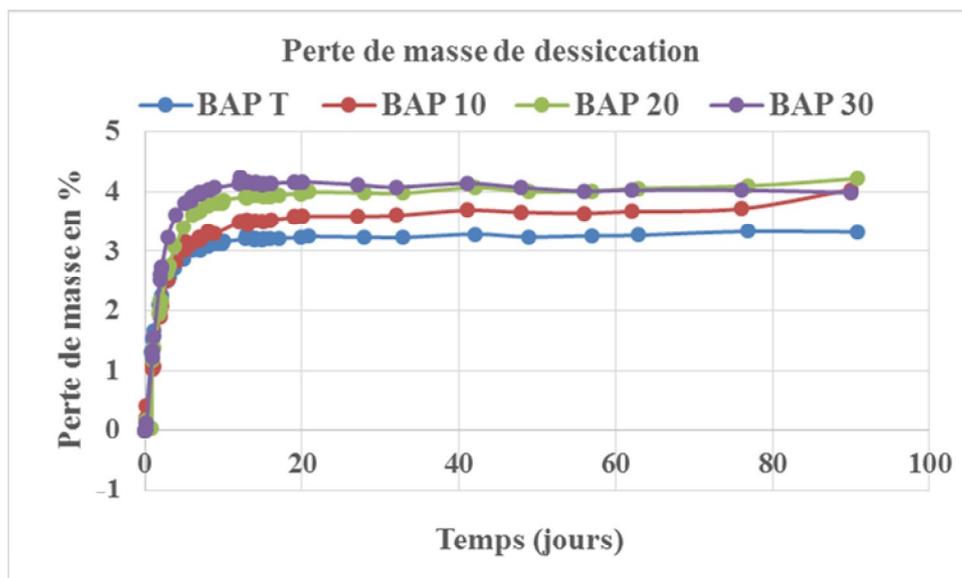


Figure II.19: Perte de masse de dessiccation des quatre BAP en fonction du temps

On constate sur la figure II.18, que le BAP-T présente les valeurs les plus élevées après la première semaine. En revanche les BAP-V présentent des valeurs inférieures par rapport au témoin jusqu'à l'âge de 60 jours où les valeurs commencent à converger. Cela peut être expliqué par le rôle à la fois physique de la vase si l'on considère les résultats des autres chercheurs qui affirment que la présence des ajouts minéraux à des taux convenables fait diminuer le retrait de dessiccation grâce à leur contribution à l'amélioration de la microstructure.

II.6 Conclusion

La substitution partielle du ciment par les différents pourcentages de vase calcinée a une incidence directe sur le comportement à l'état frais des BAP. Par conséquent, il convient d'attacher une importance toute particulière au type et marque des adjuvants à utiliser pour atteindre au mieux les propriétés visées d'un BAP à l'état frais. Néanmoins, les BAP étudiés vérifient l'ensemble des recommandations exigées par l'AFGC.

Les résultats de caractérisation mécanique en l'occurrence la résistance à la compression, montre que l'ensemble des BAP élaborés ont des résistances plus ou moins comparables, et le comportement vis-à-vis de la ségrégation statique est très satisfaisant.

Les BAP présentent des retraits totaux très proches, tandis que la présence la vase à des taux convenables fait diminuer le retrait de dessiccation, cela est le résultat de leur contribution à l'amélioration de la microstructure.

Chapitre III : Durabilité et Propriétés de transfert

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 résistant par rapport aux bétons ordinaires vis-à-vis des phénomènes affectant la durabilité.

L'objectif de ce chapitre est d'exposer les résultats de la campagne expérimentale qui a été effectuée sur les BAP de cette étude concernant la caractérisation des propriétés de transfert comme indicateurs de durabilité.

A cet effet, nous présenterons les résultats des mesures de la porosité accessible à l'eau, la porosimétrie par intrusion au mercure, la perméabilité au gaz et la migration des chlorures.

III.2 Mesure de la porosité

Résistance et porosité sont très souvent liées, la littérature montre plusieurs études et modèles qui relient les deux paramètres [105], mais la porosité englobe toute forme de vide présent au sein d'un élément, c'est pourquoi, certaines études ont montré que la résistance est fortement influencée par le diamètre moyen des pores et le pourcentage des gros pores, ce type de porosité est directement lié au rapport E/C, tandis qu'à l'échelle nanométrique, la résistance dépend principalement de la quantité et la morphologie des produits issues de l'hydratation [105]. Il est à souligner aussi que l'effet des ajouts minéraux sur la porosité n'est pas toujours le même vu qu'il est conditionné non seulement par la nature de l'addition mais aussi par sa finesse et le type de ses grains ainsi que pourcentage de substitution [106].

III.2.1 Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau des différents BAP étudiés a été déterminée par des mesures effectuées sur des disques de BAP (ep= 5cm et Diamètre= 11 cm) à l'âge de 90 jours dans le but

d'étudier l'influence de l'incorporation de la vase calcinée et ses taux de substitution sur la porosité et par conséquent sur durabilité des BAP de cette étude.

L'évolution de la porosité accessible à l'eau des BAP à 90 jours est illustrée dans la figure III.1.

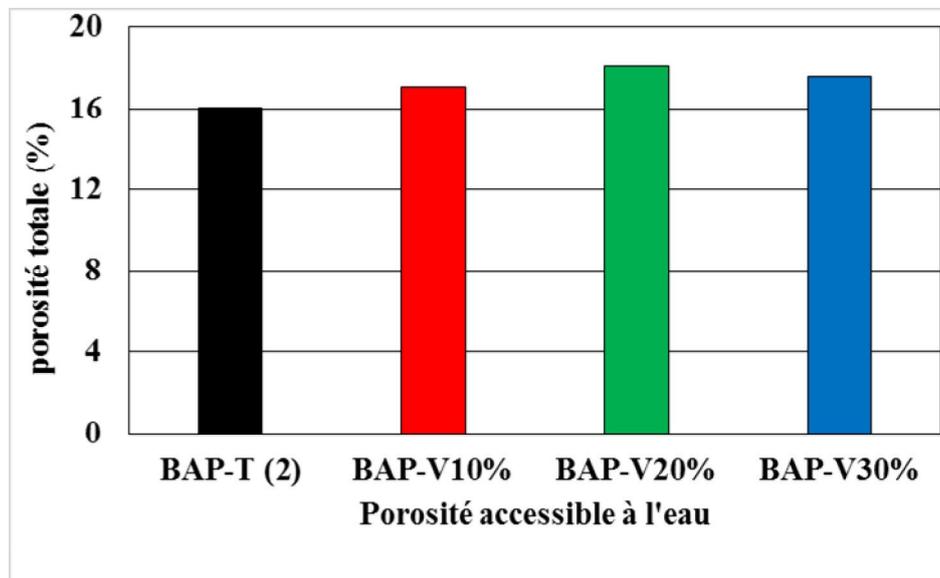


Figure III.1: Porosité accessible à l'eau des quatre BAP en fonction du temps

On remarque d'après la figure ci-dessus que la substitution du ciment par la vase calcinée augmente la porosité totale. Ce phénomène peut s'expliquer par la morphologie des grains de vase calcinée qui semblent d'après les images MEB (Chap I Partie II) avoir une surface rugueuse et donc une structure poreuse, et éventuellement à la faible densité des C-S-H résultant de la réaction pouzzolanique comparée à celle des C-S-H issues de l'hydratation du ciment [119].

III.2.2 Porosimétrie par intrusion de mercure

La porosimétrie par intrusion au mercure est l'une des techniques qui permettent la détermination de la distribution porale des matériaux. Cette technique permet de mesurer la taille des pores, leur volume cumulé et la distribution porale dans un matériau.

L'appareil utilisé dans notre étude est l'AUTOPORE IV de Micromeritics qui peut détecter des pores jusqu'à 3nm en appliquant une gamme de pression allant de 0 à 206 MPa ce qui permet de caractériser les pores ayant des diamètres compris entre 3 nm et 360 μm . Les BAP ont été sciés aux dimensions de $(2.3 \times 2.3 \times 1.5) \text{ cm}^3$ puis placés dans le porosimètre à mercure suivant la méthode qui a été décrite dans le chapitre du programme expérimental.

Les figures III.2 et III.3 représentent respectivement les courbes des volumes cumulés des pores (intrusion et extrusion) et la distribution porale sous forme de logarithme différentiel de l'intrusion du mercure pour les 4 BAP d'étude.

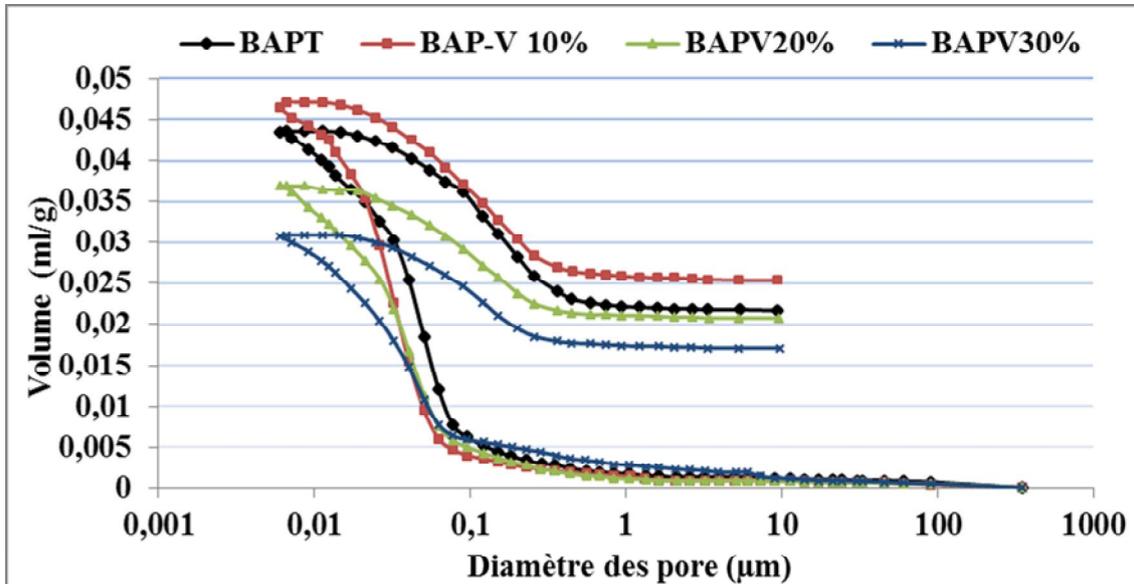


Figure III.2: Volume cumulé des pores des quatre BAP

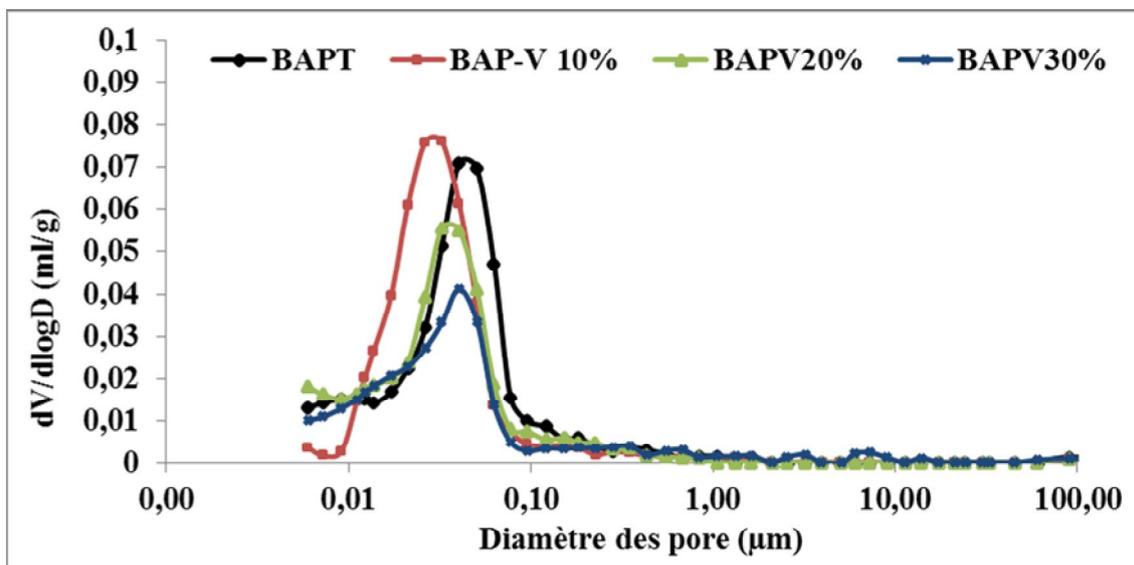


Figure III.3: Distribution porale des quatre BAP

La porosité révélée par les courbes ci-dessus est une porosité mésoporale dont la distribution est monomodale, l'ensemble des BAP à base de vase calcinée présentent une porosité légèrement plus fine que celle du témoin mais le volume des pores diffère d'un BAP à l'autre, cela pourrait être expliqué par le fort dosage en superplastifiant dans les BAP à base

de sédiment comme le montre une étude de Khatib [99] menée sur l'influence des superplastifiants sur la porosité et la structure poreuse des pâtes de ciment.

Toutefois, le dosage en superplastifiant n'est forcément pas le seul paramètre à considérer vu que les différents phénomènes cités dans la partie résistances mécaniques dans ce présent papier ont des incidences sur la structure poreuse à leurs tours, si l'on considère l'effet de dilution et celui de nucléation qui conduisent à la formation d'hydrates (à caractère poreux) dans le cas du BAP-V 10% qui est considéré à faible taux de substitution, tandis que pour les deux autres BAP respectivement 20 et 30% de vase calcinée, la grande finesse et le fort taux de substitution ont conduit à une densification et un remplissage plus important en éléments fins associés aux éventuels produits de la réaction pouzzolanique [103].

III.3 Perméabilité au gaz

La mesure de perméabilité gazeuse apparente a été réalisée selon la relation de Hagen-Poiseuille pour l'écoulement laminaire d'un fluide compressible à travers un corps poreux à capillarité fine sous pression constante. Dans cette méthode, les paramètres de débit et de sortie tels que la pression atmosphérique et la température sont pris en compte [108].

Trois pressions d'entrée à savoir 1, 2 et 3 bars ont été appliquées sur les échantillons de BAP étudiés. Les coefficients de perméabilité apparente ont été trouvés entre 4×10^{-17} et 6×10^{-17} . Les différents coefficients de perméabilité apparente K_a mesurés correspondant à chaque pression appliquée ont été tracés en fonction de l'inverse des pressions moyennes, comme le montre la figure III.4.

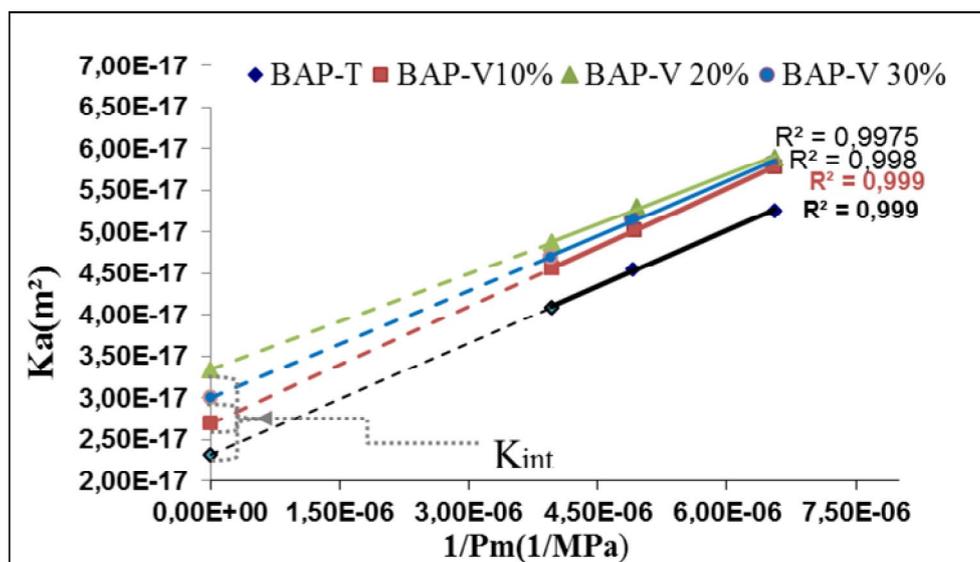


Figure III.4: Coefficients de perméabilité apparente

Des lignes de régression ont été établies pour les coefficients de perméabilité apparente de chaque BAP avec des coefficients de régression supérieurs à 0,99. Les interceptions avec l'axe des Y de ces droites de régression sont ce que Klinkenberg a défini comme des coefficients de perméabilité intrinsèques, qui sont les valeurs limites de perméabilité lorsque la pression tend vers l'infini (c'est-à-dire que l'inverse de la pression tend vers 0). Ceci implique que le gaz est converti de l'état gazeux à l'état liquide [84].

La figure III.5 illustre les valeurs des coefficients de perméabilité intrinsèque :

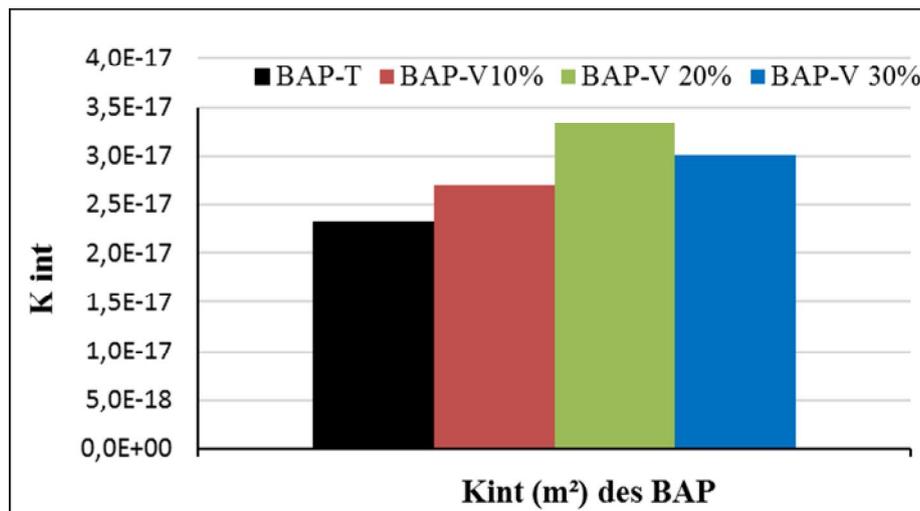


Figure III.5: Coefficients de perméabilité intrinsèque

Selon les pentes des droites de régression, comme on peut le voir sur la figure III.5, les BAP étudiés ont pratiquement le même type de porosité (les mêmes pentes impliquent des diamètres moyens des pores similaires [109]). Cependant, le BAP de référence montre les plus faibles valeurs de K_a et de perméabilité intrinsèque. Cela pourrait être justifié par la teneur en ciment dans le BAP de référence qui est la plus élevée par rapport aux autres BAP. En effet, plusieurs études montrent que la perméabilité au gaz dépend de la teneur en ciment, où la perméabilité diminue lorsque la teneur en ciment augmente [109] [111].

La quantité d'eau non utilisée due à l'effet de dilution provoque une porosité capillaire plus importante, surtout après séchage [111]. Ainsi, la perméabilité apparente augmente par l'augmentation du pourcentage de substitution. Il convient de noter que les additifs minéraux pourraient avoir un effet positif sur la microstructure du béton et par la suite sur la perméabilité aux gaz en fournissant des sites de nucléation supplémentaires pour le processus d'hydratation [100]. Cependant, au-delà de 10% de substitution, l'effet de dilution devient plus important et affecte négativement la microstructure [102] [107]. Outre ces considérations, les

réactions pouzzolaniques, fournies par la vase calcinée semblent interférer en densifiant la matrice cimentaire principalement pour le BAP-V 30%.

III.4 Migration des chlorures

Comme décrit dans le chapitre du programme expérimental, différentes cellules de migration du chlorure ont été assemblées. Pour mesurer la quantité de chlorures qui a traversé les échantillons de BAP, on a prélevé chaque jour une quantité des solutions des compartiments aval de chaque cellule et on les a soumises à un processus de titrage. Lorsque les états stationnaires ont été atteints, les coefficients de diffusion effectifs ont été estimés par l'équation donnée dans la norme XP P18-461 qui résulte de l'équation de Nernst-Planck.

La figure III.6 montre les valeurs de D_{eff} de chaque BAP et leur profil de teneur en chlorure selon la loi de Fick pour la diffusion.

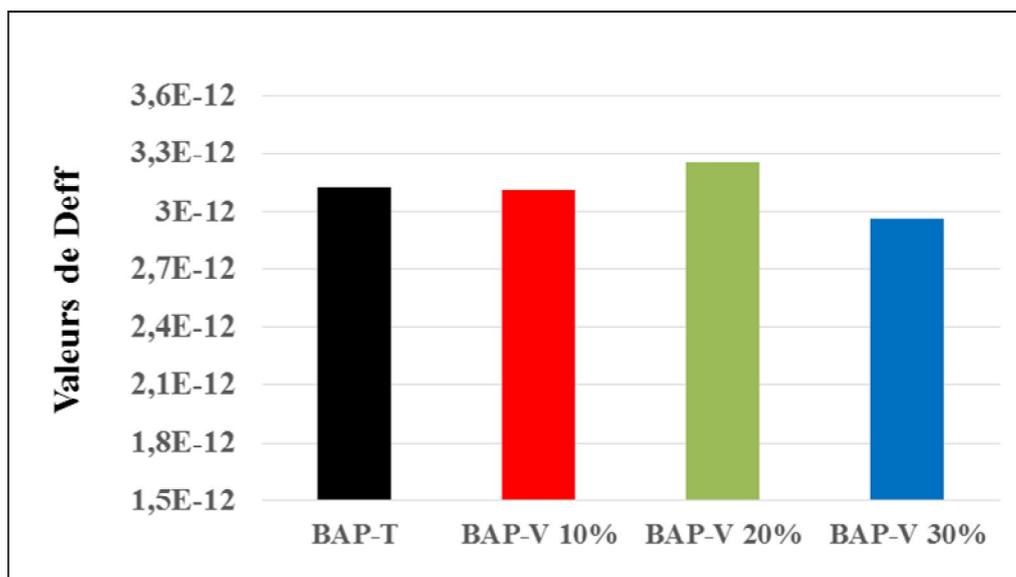


Figure III.6: Coefficients de diffusion effectifs des 4 BAP

Il est clairement observé d'après les figures ci-dessus que les différentes valeurs de D_{eff} sont très proches les unes des autres, de sorte qu'aucun effet significatif n'est réellement mis en évidence, bien qu'il devrait y avoir différents phénomènes se produisant dans chaque BAP à l'échelle microstructurale. La diffusion des chlorures dépend de la capacité de fixation des chlorures par la matrice cimentaire du béton ainsi que de la concentration de chlorures libres dans les pores saturés. Ces deux facteurs sont régis par différents paramètres tels que le rapport eau/liant, la porosité, le degré d'hydratation (teneur en C-S-H), la teneur en C_3A , le type d'additions minérales et le taux de substitution [112].

Ainsi, les résultats obtenus pourraient être attribués au fait que le BAP de référence présente le plus haut degré d'hydratation par rapport aux autres BAP à base de vase, cependant, le BAP avec 10% de vase calcinée pourrait aussi avoir un degré d'hydratation élevé lié à l'effet de nucléation [113] [114]. En outre, les produits d'hydratation liés aux réactions pouzzolaniques sont considérés comme similaires au C-S-H, ce qui conduit à une formation plus importante de sel de Friedel liée à l'alumine que contient le métakaolin dans les la vase calcinée [115] [116].

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu déterminer quelques propriétés de transfert afin de pouvoir caractériser les BAP de notre étude vis-à-vis de la durabilité.

L'ensemble des BAP à base de vase calcinée présentent de faibles porosités avec des tailles de pores n'excédant pas les 10 nm ce qui est un facteur positif pour qualifier la durabilité des BAP de cette étude.

La substitution du ciment par la vase calcinée du barrage chorfa avec des taux de substitution arrivant à 20% affecte légèrement la perméabilité apparente au gaz et les coefficients effectifs de diffusion des chlorures, ces derniers étaient assez proches les uns aux autres. Cela pourrait être dû à la compensation entre les effets positifs et négatifs des différentes réactions et mécanismes qui se produisent dans la microstructure du béton. Cependant, il a été constaté qu'en augmentant le taux de substitution à 30%, l'effet de la vase calcinée reste favorable à la diminution de la perméabilité aux gaz et de la diffusion des chlorures.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les travaux de notre étude ont été menés dans le but d'atteindre deux principaux objectifs, le premier concerne la mise en évidence de la valorisation de la vase du barrage Chorfa II de la région de Sig (ouest Algérien), en tant qu'un matériau à caractère pouzzolanique nécessitant peu d'énergie dans son exploitation, pour être utilisé en substitution minéral partiel au ciment rentrant dans la composition des BAP. Le deuxième objectif est de donner une réponse fondée sur l'influence du pourcentage de substitution en vase calcinée sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des BAP en se référant aux propriétés d'ouvrabilité, de résistance et d'ouvrabilité exigées pour ce type de béton.

Pour répondre à cela, nous avons commencé par la caractérisation des différents matériaux utilisés dans les compositions des bétons d'études. Puis nous avons investigué la pouzzolanité de la vase après calcination à 750 °C, via l'analyse DRX, l'essai Chapelle modifié basé sur les analyses ATG et la détermination de l'indice d'activité pouzzolanique. Cette série d'essai a révélé la présence de kaolinite dans la vase chorfa qui après calcination se transforme en métakaolin d'où les vertus pouzzolaniques de la vase chorfa après traitement.

Pour la partie béton de l'étude, nous avons adopté une formulation de BAP dite de référence et nous l'avons adaptée à trois autres formulations incorporant respectivement 10, 20 et 30% de vase calcinée. L'ajustement de la formulation de référence à l'incorporation de la vase s'est fait en passant par le concept du mortier de béton équivalent. Cette étape a permis de travailler avec des quantités réduite de matériaux. Les quatre formulations finales sont élaborées à partir des mêmes constituants, avec le même squelette granulaire et un rapport E/Li identique et elles sont de la même classe de résistance.

Les principales conclusions auxquelles nous sommes parvenues sont :

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

L'introduction de la vase dans le BAP conduit à une perte d'ouvrabilité due à sa grande surface spécifique et la structure de ses grains, ce qui nécessite l'augmentation du dosage en superplastifiant.

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

La vase calcinée du barrage Chorfa a un indice d'activité pouzzolanique proche de 1 ce qui fait d'elle un matériau potentiellement substituable au ciment.

L'essai Chapelle modifié confirme le caractère pouzzolanique de la vase calcinée suite à la réaction entre la vase calcinée et une partie de la chaux dans un mélange vase/chaux à proportions égales et en consistance normale.

La formulation du MBE par la méthode de l'équivalence des surfaces développées nécessite l'utilisation de coefficients de majoration à cause des hypothèses prévues par cette méthode.

A l'état durci, les premiers résultats expérimentaux ont montré que les valeurs des résistances en compression à 28 jours sont très proches avec une légère supériorité pour le BAP-T, mais elles convergent pratiquement après l'âge de 60 jours pour le BAP-V 10%, cependant, au-delà de 90 jours les BAP-V 10% et BAP-V 20 % affichent des résultats nettement meilleurs par rapport au témoin, ceci est dû à la réaction pouzzolanique tardive à l'instar de nombreuses additions minérales telles que la pouzzolane naturelle et le métakaolin.

Les BAP présentent des retraits totaux très proches, tandis que la présence la vase à des taux convenables fait diminuer le retrait de dessiccation, cela est le résultat de leur contribution à l'amélioration de la microstructure.

A travers la mesure des paramètres caractérisant les propriétés de transfert, à savoir : porosité totale et porosité capillaire, perméabilité au gaz (apparente et intrinsèque) et le coefficient de diffusion des chlorures pour les BAP de cette étude, nous avons constaté des performances très comparables, voire meilleures pour les BAP à base certains pourcentages de substitution en vase calcinée face au BAP témoin.

Donc, les résultats montrent que la vase calcinée du barrage Chorfa II influe considérablement et positivement sur les propriétés des bétons autoplaçants (BAP) ainsi que leur porosité, ce qui fait des BAP à base de vase calcinée des BAP potentiellement durables.

La possibilité de valoriser la vase du barrage Chorfa II (activée thermiquement afin de transformer les structures minérales qui sont à l'état naturel stables, en structures amorphes en l'occurrence la kaolinite en métakaolin) dans le but d'en fabriquer un substitut aux liants hydrauliques d'usage courant semble réalisable jusqu'à 30% de taux de substitution. Ce taux est d'ailleurs celui que nous jugeons optimal vu ce qu'il offre comme compromis entre économie et performances techniques.

Perspectives :

Les premiers résultats obtenus dans cette étude sont encourageants quant à l'utilisation de la vase de Chorfa II dans les matériaux cimentaires. Nous pourrions envisager en toute évidence quelques perspectives qui sont décrites ci-dessous :

Faire substituer une partie de ciment par la vase calcinée et d'étudier plus de paramètres physico-mécaniques tels que les modules d'élasticité statique et dynamique, et d'autres paramètres de durabilité tels que les attaques des différents agents agressifs, et l'attaque sulfatique interne.

Enfin, une étude plus approfondie sur l'optimisation du mode de calcination de la vase Chorfa, car celui adopté dans cette étude vient de la littérature, seulement, les sédiments de dragage montre une très grande diversité en matière de composition chimique et minéralogique, ce qui remet en cause le fait d'avoir un seul mode de traitement. C'est pourquoi nous jugeons primordial d'adapter le mode de traitement à chaque famille de sédiment de façon à avoir un produit de qualité optimale.

Ainsi, nous jugeons utile d'entreprendre une vraie étude économique qui permettrait d'exploiter à l'échelle industrielle la vase du barrage de Chorfa II.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **AFGC 2008**. « Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants », (janvier 2008).
- [2] **OKAMURA H.** «Self-compacting concrete. Development, present and future», Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suede, pp. 3-14, 13-15 September 1999.
- [3] **AFGC 2002**. «Interim recommendations for use of Self-Compacting Concrete», Association Française de Génie Civil, 2002. Association
- [4] **AFGC** « Recommandations provisoires », document scientifique et technique (juillet 2000)
- [5] **SEDRAN T.** «Les Bétons Autonivelants», bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-Avril 1995.
- [6] **TURCRY P.** Thèse de doctorat en Génie Civil, « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants –Influence de la formulation », Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, février 2004.
- [7] **ADAM N. VILLE**, « Propriétés des bétons », traduit par le CRIB (Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, SHERBROOKE-LAVAL), septembre 2000.
- [8] **BOUHAMOU N.** Thèse de Doctorat, « influence des rapports eau/ciment et fines/ciment sur le comportement a l'état frais et durci du béton autoplaçant à base de matériaux locaux Algériens». Université de Mostaganem, Algérie. (2008)
- [9] **EFNARC**, Specifications and guidelines for self-compacting concrete, fevrier 2002.
-

-
- [10] **JOSSERAND L.** Thèse de doctorat en Structures et Matériau, «Ressuage des bétons hydrauliques », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, le 11 octobre 2002.
- [11] **YURIGI, SAKATA N, IWAI M, SAKAI G.** (1993), «Mix design for highly workable concrete », Conference concrete 2000, Dundee, 7-9 September, p11.
- [12] **NF EN 934-2**, Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 2 : Adjuvants pour bétons – Définitions, spécifications et critères de conformité.
- [13] **ACKER P.**, « Sur les origines du retrait et du fluage du béton », Revue française de génie civil, volume 7, 2003.
- [14]
- [15] **AİTCIN, P-C., JIANG, SHIPPING, KIM, B-G, Nkinamubanzi, P. C., et Petrov, N.** « L'interaction ciment/superplastifiant. Cas des polysulfonates. », *BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES*, 2001, p. 87-98.
- [16] **BETHMONT S.**, « Mécanismes de ségrégation dans les BAP ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 2005.
- [17] **MATSUOKA S.**, «Development of combinaison type Self-Compacting Concrete and Evaluation Test Methods», Journal of Advanced Concrete technology, 2003.
- [18] **BILLBERG P.**, «Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration», Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, October 2001.
- [19] **HAYAKAWA M., MATSUOKA Y. and YOKOTA K.**, «Application of superwo kable concrete in the construction of 70-story building in Japan», Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, 1995.
- [20] **PETERSSON Ö, BILLBERG P. and VAN B.K.** «A model for Self-Compacting Concrete», International Rilem Conference on 'Production methods and workability of concrete', RILEM Proceedings 32, 1996.
-

-
- [21] **OKAMURA** et **OUCHI**, «Self-compacting concrete», *Journal of advanced Concrete Technology*, 2003
- [22] **SEDRAN**, «Rhéologie et Rhéométrie des bétons: application aux bétons autonivelants», 1999, thèse de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées.
- [23] **EDAMATSU**, **NISHIDA**, et **OUCHI**, «A rational mix-design method for self Compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles», *Proceedings of the 1st international RILEM Symposium*.
- [24] **VAN BUI**, et **MONTGOMERY**, «Mixture proportioning method for self-compacting High Performance concrete with minimum paste volume», *Proceedings of the 1st international RILEM Symposium*, 1999.
- [25] **DE LARRARD, F.** et **SEDRAN, Th.** «Une nouvelle approche de la formulation des bétons», In : *Annales du BTP*. 1999. p. 39-54.
- [26] **Abdellah El Hilali**, « Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) : influence des fillers calcaires et des fibres végétales », Université de Cergy-pontoise 2009.
- [27] **DE LARRARD, F.** et **LE ROY, R.** « Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances », *Materials and Structures*, 1992, vol. 25, no 8, p. 464-475.
- [28] **LE ROY R,** **DE LARRARD F,** et **PONS G.,** « Calcul des déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances », *Extension du domaine d'application des règlements de calcul BAEL/BPEL aux bétons à 80 MPa*, *Bulletin des LCPC*, spécial XIX, mai 1996.
- [29] **DE LARRARD F**, «Concrete mixture-proportioning - A scientific approach» , *Modern Concrete Technology Series*, N°9, E&FN SPON, 1999.
- [30] **PERA J., HUSSON S. and GUILHOT B,** «Influence of finely ground limestone on cement hydration», *Cement and Concrete Composites*, 1999.
-

-
- [31] **GIBBS J.C. and ZHU W**, « Strength of hardened self-compacting concrete», Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, septembre 1999.
- [32] **SONEBI M. and BARTOS P.J.M**, «Hardened SCC and its bond with reinforcement», Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, Septembre 1999.
- [33] **PETERSSON Ö.** « Limestone powder as filler in self-compacting concrete Frost resistance and compressive strength», Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, octobre 2001.
- [34] **FELEKOGLU B., YARDIMCI M. Y. and BARADAN B.**, «A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete», Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, août 2003.
- [35] **SHI C., WU Y., SHAO Y. and RIEFLER M.**, «Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete», First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, novembre 2002.
- [36] **PONS G., PROUST E. and ASSIE S.**, «Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete», Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, août 2003.
- [37] **KLUG Y. and HOLSCHEMACHER K.**, «Material properties of hardened self-compacting concrete», ICPCM – A new era of building, Le Caire, Egypte, février 2003.
- [38] **BARCELO L., BOIVIN S., ACKER P., TOUPIN J. and CLAVAUD B.**, «Early age shrinkage of concrete: back to physical mechanisms», Concrete Science and Engineering, Vol 03, juin 2001.
- [39] **GRAM H. - E., PIIPARINEN P.**, «Properties of SCC – Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance», Proceeding of First International
-

RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, septembre 99

- [40] **TURCRY P.**, « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation », thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2004.
- [41] **HU C. et BARBIERI B.**, « Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel », Science des matériaux et propriétés des bétons, pp.265-272, 1^{ère} Rencontre Internationale, Toulouse, 5-6 mars 1998.
- [42] **PERSSON B.**, «Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete», Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, 13-15 septembre 1999.
- [43] **ZATER M.**, « Caractérisation et Etude Structurale par Diffraction des RX des Oxalates mixtes à base de cuivre, de titane et de plomb », Thèse de magister en chimie Université Mentouri de Constantine (2007).
- [44] **COURS de Minéralogie** – 3^{ème} année « Etude des cristaux par les rayons X », Ecole national polytechnique, Département Génie Minier.
- [45] **ACKER.P.**, « Comportement mécanique du béton: Apports de l'approche physico-chimique », Rapport de Recherche LPC, N°152, Juillet 1988, 122p.
- [46] **ITIM. A, EZZIANE. K, KADRI EL-H.** « étude des déformations de retrait d'un mortier contenant différentes additions minérales ». 2010.
- [47] **PROUST E.**, « Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés », thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2002.
- [48] **INGRID APAYA**, « retrait endogène et de séchage des BAP à air entraîné contenant divers composés organiques comme anti-retrait, 2011.
- [49] **CHRISTOPHE CARDE**, « pathologie le retrait des bétons ». Directeur technique du LERM, 2006.
-

-
- [50] **BOUASKER. M, GRONDIN .F, et KHELIDJ. A** « Retrait chimique des mortiers au très jeune âge » : influence des inclusions granulaires.
- [51] **AMMARI. A.** « Vulnérabilité à l'Envasement des Barrages (cas du bassin Hydrographique des Côtiers Algérois) », thèse doctorat, 2012.
- [52] **HAIFI M.R.** « FORMULATION DES BETONS AUTOPLACANTS », Thèse de Magister, Université de Canstantine. Algérie. 2011.
- [53] **GUILLON.E.,** « Durabilité des matériaux cimentaires et modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles». Thèse de doctorat, d'école normale supérieure de Cachan, France 2004.
- [54] **SCHWARTZENTRUBER, A. et CATHERINE, C.** La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés. *Materials and structures*, 2000, vol. 33, no 8, p. 475-482.
- [55] **BELAIDI, A et BRIXI, A** « ETUDE DE L'INFLUENCE DES ADDITIONS ET DES ADJUVANTS SUR LES PROPRIETES AUX ETATS FRAIS ET DURCI DES BETONS ». Thèse de doctorat. 2014.
- [56] **SIAD HOCINE,** «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.
- [57] **J. BARON, J. P. OLLIVIER,** «Les bétons bases et données pour leur formulation». Edition Eyrolles. Deuxième tirage, 1997.
- [58] **Z.GUEMMADI, G.ESCADECUAS, B.TOUMI, H.HOUARI, P.CIASTRES,** «Influence des fillers calcaires sur les performances mécaniques des pâtes de ciment ». 1er Congrès international sur la technologie et la durabilité du béton, U.S.T.H.B Alger- Algérie, pp 1-8, 24-26 Mai 2004.
- [59] **KHAYAT K.H (1998),** «Use of viscosity-modifying admixture to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete», *ACI Material journal*, vol.95 N°2.
-

-
- [60] **R.DUPAIN, R. LANCHON ET J.C. SAINT ARROMAN**, « Granulat, Sols, Ciments et Bétons», caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, 2^{ème} édition conforme aux normes européennes, édition Educative, 1995, pp 235.
- [61] **RENAUD.H.**, « Constructeur bâtiment technologique » tome 1. Les éditions foucher, Paris 1982.
- [62] **LARGENT.R.**, «Estimation de l'activité pouzzolanique – recherche d'un essai». Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées -93-janv-févr. 1978 - Réf. 2143. PP.61
- [63] **SEMCHA A.** «Valorisation des sédiments de dragage: Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug». Thèse de doctorat à l'Université de Reims Champagne-Ardenne. Génie Civil. Décembre 2006.
- [64] **CASSAGNABÈRE, F, MOURET, M, ESCADEILLAS, G, et al.** Metakaolin, a solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: Mechanical aspects. *Construction and Building Materials*, 2010, vol. 24, no 7, p. 1109-1118
- [65] **FOUCAULT A., RAOULT J.F.** « Dictionnaire de géologie ». Editions Masson, Paris 1980. ISBN 2-25-654661-1.
- [66] **SHNEIDER G.** «Le curage des sédiments des cours d'eau ». Le courrier de l'environnement de l'INRA, 2001, vol. 43, pp. 146-147.
- [67] **BERTREAU I., MARTIN S., VASSILIADIS A.** « Le curage des cours d'eau lorsque les sédiments contiennent des éléments-traces toxiques ». Le courrier de l'environnement de l'INRA, 1993, vol. 20, pp. 27-35.
- [68] **Agence de l'eau (1).** « Méthode de gestion et de réutilisation des sédiments pollués ». Inventaire détaillé des techniques de curage, transport, traitement et usage des sédiments .2002, 126 p.
- [69] **CHIKOUCHE Med.A,** «Effet des ajouts à base d'argiles gréseuses et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaires» Thèse Présenté pour l'obtention du
-

diplôme de Magister spécialité : Génie Civil Option : Matériaux, université de M'SILA, 2008.

- [70] **G.LUCAS, P.CROS, J.LANG**, « Les roches sédimentaires, étude microscopique des roches meubles et consolidées », Tome 2, édition DOIN, 1976, P 38.
- [71] **N.S.SORO**, « Influence des ions fer sur les transformations thermiques de la kaolinite », Thèse pour l'obtention d'un grade de docteur, spécialité sciences des matériaux céramiques et traitements de surfaces, université de Limoges, 2003, P 16-19, 34.
- [72] **SCORDIA P-Y**, «Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers», Thèse pour l'obtention du grade de docteur, l'école centrale de LILLE, Spécialité : Génie Civil, 2008. P 7-23.
- [73] **BOUCARD L.** « Valorisation de sédiments fluviaux stabilisés». Thèse de l'Université de Lille, 2006, 206 p.
- [74] **BONNET C.** «Développement de bio-essais sur sédiments et applications de l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés». Thèse de l'Université de Metz, 2000.
- [75] **Ghrici, M., Kenai, S., Said-Mansour, M. et Kadri, E.**, « Some engineering properties of concrete containing natural pozzolana and silica fume ». *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 5(2): 349-354, 2006.
- [76] **LARBI, J. A.** «Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete ». *NASA STI/Recon Technical Report N*, 1993, vol. 94.
- [77] **SCRIVENER, K. L., CRUMBIE, A. K., et LAUGESSEN, P.** «The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete ». *Interface science*, 2004, vol. 12, no 4, p. 411-421.
- [78] **SALIH, S. A.** «Permeability and pore structure of cementitious composites». Thèse de doctorat. University of Sheffield, Department of Civil and Structural Engineering. 1987.
-

-
- [79] **DANA, E.** « Contribution à la caractérisation des écoulements biphasiques dans les matériaux poreux »: étude expérimentale sur trois grès. 1999. Thèse de doctorat. Lille 1.
- [80] **DULLIEN, F.A.L.** « Porous media: fluid transport and pore structure ». Academic press, 2012.
- [81] **ROZIER E.**, « Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle », Thèse de doctorat, l'Ecole Centrale de Nantes, 2007.
- [82] **LOOSVELDT. H, LAFHAJ. Z, et SKOCZYLAS. F.** « Experimental study of gas and liquid permeability of a mortar». Cement and Concrete Research, 2002, vol. 32, no 9, p. 1357-1363.
- [83] **LION, Maxime.** « Influence de la température sur le comportement poromécanique ou hydraulique d'une roche carbonatée et d'un mortier ». Etudes expérimentales. 2004. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I.
- [84] **KLINKENBERG, L. J, et al.** « The permeability of porous media to liquids and gases». In : Drilling and production practice. American Petroleum Institute, 1941.
- [85] **CARMAN, P.C.** « Flow of gases through porous media ». Academic press, 1956.
- [86] **BERRYMAN, J. G. et BLAIR, S.C.** « relations and image processing methods for estimating Darcy's constant ». Journal of Applied Physics, 1987, vol. 62, no 6, p. 2221-2228.
- [87] **VILLAIN. G, BAROGHEL-BOUNY. V, KOUNKOU. C,** et al. « Mesure de la perméabilité aux gaz en fonction du taux de saturation des bétons ». Revue française de génie civil, 2001, vol. 5, no 2-3, p. 251-268.
- [88] **CHEN. X.T.** « Effet du chauffage sur le comportement mécanique et poromécanique de matériaux cimentaires: propriétés hydrauliques et changements morphologiques ». 2009. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille.
-

-
- [89] **PICANDET, V.** « Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons ». Thèse de doctorat. Université de Nantes. 2001.
- [90] **AFPC-AFREM,** « Journées Technique. Durabilité des bétons Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associés à la durabilité ». Toulouse, France, 1997.
- [91] **BUIL, M. et OLLIVIER, J. P.** « Conception des bétons: la structure poreuse. La Durabilité des Bétons », Presses de l'École Nationale de Ponts et Chaussées, Paris, 1992, p. 63-81.
- [92] **NILSSON, L. O., POULSEN, E., SANDBERG, P., et al. HETEK.** « Chloride penetration into concrete, state-of-the-art, transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models ». Denmark, ISSN/ISBN, 1996, p. 0909-4288.
- [93] **TRUC. O.** « Prediction of chloride penetration into saturates concrete-multi-species approach ». 2000. Thèse de doctorat. Toulouse, INSA.
- [94] **ARYA, C., BUENFELD, N. R., et NEWMAN, J. B.** « Factors influencing chloride-binding in concrete. Cement and Concrete research », 1990, vol. 20, no 2, p. 291-300.
- [95] **FREY, R., BALOGH, T., et BALAZS, G. L.** « Kinetic method to analyse chloride diffusion in various concretes ». Cement and concrete research, 1994, vol. 24, no 5, p. 863-873.
- [96] **HUSSAIN. S.E, AL-MUSALLAM. A, AL-GAHTANI. A.S, et al.** « Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete ». Cement and Concrete Research, 1995, vol. 25, no 7, p. 1543-1555.
- [97] **BYFORS. K, HANSSON, C.M., et TRITTHART. J.** « Pore solution expression as a method to determine the influence of mineral additives on chloride binding ». Cement and Concrete Research, 1986, vol. 16, no 5, p. 760-770.
-

-
- [98] **LARSEN, C. K.** « Chloride binding in concrete, Effect of surrounding environment and concrete composition ». These de doctorat, The Norwegian University of Science and Technology Trondheim Norway, 1998.
- [99] **KHATIB, J. M. et MANGAT, P. S. g** « Influence of superplasticizer and curing on porosity and pore structure of cement paste ». Cement and Concrete Composites, 1999, vol. 21, no 5-6, p. 431-437.
- [100] **CYR, M, LAWRENCE, Ph, et RINGOT, E.** « Mineral admixtures in mortars: quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration ». Cement and concrete research, 2005, vol. 35, no 4, p. 719-730.
- [101] **ANGER, B.** « Caractérisation des sédiments fins des retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière ». 2014. Thèse de doctorat. Caen.
- [102] **CYR, M, LAWRENCE, Ph, et RINGOT, E.** « Efficiency of mineral admixtures in mortars: quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength ». Cement and concrete research, 2006, vol. 36, no 2, p. 264-277.
- [103] **SCRIVENER, K.L., LOTHENBACH, B, DE BELIE, N, et al.** **TC 238-SCM:** « hydration and microstructure of concrete with SCMs. Materials and Structures » 2015, vol. 48, no 4, p. 835-862.
- [104] **SAMARA, M., ROZIÈRE, E, KHOKHAR, M, et al.** « Valorisation des sédiments traités dans le béton autoplaçant ». In : XXVIèmes Rencontres universitaires de Génie Civil. 2008.
- [105] **KHATIB, J. M. et MANGAT, P. S.** « Porosity of cement paste cured at 45°C as a function of location relative to casting position ». Cement and concrete composites, 2003, vol. 25, no 1, p. 97-108.
- [106] **DA SILVA, P. R. et DE BRITO, J.** « Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler ». Construction and Building Materials, 2015, vol. 86, p. 101-112.
-

-
- [107] **OEY, T, KUMAR, A, BULLARD, J. W., et al.** « The filler effect: the influence of filler content and surface area on cementitious reaction rates ». *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, vol. 96, no 6, p. 1978-1990.
- [108] **GÜNEYISI, E, GESOĞLU, M, KARAOĞLU, S, et al.** « Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes ». *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 34, p. 120-130.
- [109] **KAMECHE, Z.A., GHOMARI, F, KHELIDJ, A, et al.** « Measurement of the Relative Gas Permeability of Ordinary Concrete: Influence of Saturation Degree and the Sample Size ». In : *VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*. 2013. p. 2066-2076.
- [110] **BOEL, V et DE SCHUTTER, G.** « Porosity of superplasticised cement paste containing limestone filler ». *Advances in Cement research*, 2006, vol. 18, no 3, p. 97-102.
- [111] **BERKANI, F et BELAKROUF, A.** « Important transport property controlling the durability of concrete: the permeability to oxygen ».
- [112] **DOUSTI, A, SHEKARCHI, M, ALIZADEH, R, et al.** « Binding of externally supplied chlorides in micro silica concrete under field exposure conditions ». *Cement and Concrete Composites*, 2011, vol. 33, no 10, p. 1071-1079.
- [113] **JUSTNES, H.** « A review of chloride binding in cementitious systems ». *NORDIC CONCRETE RESEARCH-PUBLICATIONS-*, 1998, vol. 21, p. 48-63.
- [114] **RAHMAN, M.K, AL-KUTTI, W.A., SHAZALI, M A., et al.** « Simulation of chloride migration in compression-induced damage in concrete ». *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, vol. 24, no 7, p. 789-796.
- [115] **WANG, L et UEDA, T.** « Mesoscale modelling of the chloride diffusion in cracks and cracked concrete ». *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2011, vol. 9, no 3, p. 241-249.
- [116] **AVET F, MARAGHECHI H et SCRIVENER K.** « Analysis of chloride transport and binding in limestone-calcined clay binders with various kaolinite
-

content ». 14th International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC), Ghent (Belgium), 29-31 May 2017.

[117] **BENAMARA. L, OUHBA. K et HAMWI. A,** « Élaboration d'une pouzzolane de synthèse à partir des sédiments de barrage ». *Environnement & technique*, 2013, no 330, p. 40-44.

[118] **CHIKOUCHE, M, GHORBEL, E, et BIBI, M.** « The possibility of using dredging sludge in manufacturing cements: Optimization of heat treatment cycle and ratio replacement ». *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 106, p. 330-341.

[119] **DEBOUCHA, W,** « Contribution à la formulation et à l'évolution des performances de bétons environnementaux ». Thèse de doctorat. Université des sciences et de la technologie Houari Boumediène (USTHB). Septembre 2017.
