



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE 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

Département de Génie Civil et d'Architecture



Faculté des sciences et de la technologie
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

N° D'ORDRE : D-LMD...../2019

Thèse présentée pour l'obtention du
DIPLOME DE DOCTORAT 3^{ème} CYCLE
SPECIALITE : GENIE CIVIL
OPTION : Géo-Matériaux et Environnement
PAR

TAIEB FATIMA

Contribution à l'Étude du Retrait des Mortiers de Béton
Autoplaçant Équivalent à Base de Sédiments de Dragage

Date de soutenance : 05 / 05 / 2019

Devant la commission de jury composé de :

Président :	BENDANI Karim	Professeur	Université de Mostaganem
Examineurs :	MEBROUKI Abdelkader	Professeur	Université de Mostaganem
	AYED Kada	Maître de conférences A	ENP d'Oran
Directrice de thèse :	BELAS Nadia	Professeur	Université de Mostaganem

ANNÉE UNIVERSITAIRE: 2018/2019

ملخص

تشجع الاعتبارات البيئية الحالية على تطوير تركيبات جديدة للمونة أو الخرسانة الأكثر احتراماً للبيئة. يجب أن تتميز هذه المواد، على وجه الخصوص، فيما يتعلق باستخدامها في سياق احترام البيئة والبناء المستدام.

وقد وجدت النفايات الصناعية مكانها كمادة اسمنتية في صناعة الخرسانة أو المونة. يمكن دمج هذه النفايات، مثل دخان السيليكات، وخبث الفرن العالي المحبب، والرماد المتطاير، وما إلى ذلك، كإضافة معدنية أو ركام ناعم (رمل) في المواد الإسمنتية لتحسين خصائص معينة في الحالة الطازجة أو الصلبة. ومع ذلك، هناك أنواع أخرى من النفايات الطبيعية التي تحتاج إلى تمييز، منها رواسب تجريف السدود التي تتطلب المعالجة عن طريق التكليس لجعلها متفاعلة.

لقد تم تطوير مفهوم مونة الخرسانة ذاتية الدمك المكافئة (م خ ذ د م) والتحقق من صحتها كأداة لصياغة خرسانة ذاتية الدمك. من الممكن خصوصاً تحسين الثلاثية الاسمنت / إضافة معدنية / ملدن مباشرة على المونة من خلال تجنب الاختبارات الثقيلة والمملة على الخرسانة ذاتية الدمك. في هذا الوقت، لا يزال هناك نقص في متابعة السيطرة الكاملة على السلوك المؤجل الحر لمونة الخرسانة ذاتية الدمك المكافئة المحتوية على الرواسب المعالجة.

الهدف من هذا البحث هو أولاً تحديد تأثير خصائص اثنين من الإضافات المعدنية (الطمي المعالج والرماد المتطاير) وتطوير هياكلها المجهرية على الآليات التي تحدث على المستوى المجهرى مما يؤدي إلى تطوير المقاومة الميكانيكية (انضغاط وشد)، الانكماش قصير وطويل الأجل والتشقق بسبب الانكماش المقيد. في الخطوة الثانية، يتم دراسة خصائص النقل لمحاولة التنبؤ بالانكماش والتشقق بسبب الانكماش المقيد. أجريت دراسة تجريبية منهجية على سلسلة من ستة تراكيب من معاجين الرباط وستة تراكيب من مونة الخرسانة ذاتية الدمك المكافئة معدة بنفس النسبة من الإضافة المعدنية (22%) ولكن مع نسبتيين من الماء / الرباط (0.39 و 0.47).

تأثير طبيعة الرباط على خصائص الحالة الطازجة (الانسياب الحر وزمن الاخذ) وخصائص الحالة الصلبة (المقاومة الميكانيكية، تحاليل المجهرية (المسح المجهرى الإلكتروني - قياس الأشعة السينية - النقل النوعي الحراري)، الانكماش اللدن، والانكماش الحر (الكلبي، الذاتي والجفاف)، والتشقق بسبب الانكماش المقيد وقياس خصائص النقل (الامتصاص الشعري والمسامية المفتوحة) تم تحديده. ان استخدام تقنيات مختلفة يؤدي الى إيجاد علاقات بين تطوير المجهرية المدروسة وقياسات الانكماش التي تم الحصول عليها. أيضاً تم دراسة تأثير العامل م / ر على الانكماش قصير وطويل الأجل في هذا البحث.

أظهرت نتائج قوة الانضغاط أن الرواسب المعالجة أعطت تأثيراً إيجابياً لمونة الخرسانة ذاتية الدمك المكافئة (م خ ذ د م). تظهر نتائج اختبارات الامتصاص الشعري والمسامية التي يمكن الوصول إليها من الماء، أن طبيعة الإضافة المعدنية في مونة الخرسانة ذاتية الدمك المكافئة (م خ ذ د م) لها تأثير كبير على الخواص الفيزيائية الميكانيكية وخصائص نقل هذه المونات. أعطت المونات المحتوية على الرواسب المعالجة على قيم انكماش مقبولة تشبه إلى حد كبير تلك القيم التي تم الحصول عليها من المونات المحتوية على الرماد المتطاير ولكنها أعلى بقليل من تلك الموجودة في المونات المرجعية. قدمت تحليلات المجهرية بعض التفسيرات. وبشكل عام، فإن الاستبدال الجزئي للإسمنت البورتلاندي بنسبة 22% من الطمي المعالج بواسطة التكليس يظهر ميزة اقتصادية وبيئية وتكنولوجية حقيقية.

الكلمات المفتاحية: مونة الخرسانة ذاتية الدمك المكافئة (م خ ذ د م) - الرواسب المعالجة - الرماد المتطاير - المقومات الميكانيكية - الانكماش اللدن - الانكماش الحر - تشقق - تحليلات مجهرية - خصائص النقل

ABSTRACT

Current environmental considerations encourage the development of new formulations of mortars or concrete more eco- respectful. Such materials must be characterized, in particular, with regard to their use in the context of respect for the environment and sustainable construction.

Industrial waste has found its place as cementitious materials in the manufacture of concretes or mortars. These wastes, such as silica fume, granulated blast furnace slag, fly ash, etc., can be incorporated as a mineral addition or fine aggregate (sand) in cementitious materials to improve certain properties in the fresh state or hardened. However, there are other types of natural waste that need to be upgraded, namely sediment dredging dams that require treatment by calcination to make them active.

The concept of self-compacting concrete equivalent mortar (SCCEM) has been developed and validated as an efficient tool for the formulation of self-compacting concrete. This is a method that allows optimizing the mixture of three components, cement / additions / admixture, directly to formulate mortar by avoiding complicated and tedious tests on self-compacting concrete. At this time, a lack of follow-up persists in the complete control of the free deferred behavior of the equivalent self-compacting concrete mortar containing treated sediments.

The aim of this research is to first determine the influence of the characteristics of two mineral additions (calcined mud and fly ash) and the development of their microstructures on the mechanisms occurring at the microscopic level leading to the development of strength mechanical (compression and flexural), the short and long-term shrinkage and cracking due to restrained shrinkage. In the second stage, transfer properties are studied for an attempt to predict the shrinkage and cracking due to restrained shrinkage.

A systematic experimental study was carried out on a series of six compositions of binder pastes and six compositions of self-compacting concrete mortars equivalent prepared with the same percentage of mineral addition (22%) but with two water / binder ratios ($W / B = 0.39$ and $W / B = 0.47$). The effect of the nature of the binder on the characteristics in the fresh state (the slump flow and setting time) and the characteristics in the hardened state (the mechanical strengths, microstructural analysis (TGA, XRD, SEM- EDX)), plastic shrinkage, the free shrink (total, autogenous and drying), cracking due to restrained shrinkage and measuring transfer properties (capillary absorption and the open porosity) is quantified. The use of different techniques used to establish the relationship between the development of the microstructure studied and obtained shrinkage measures. Also, the effect of the W / B parameter on short- and long-term shrinkage is studied in this research.

The results of the compressive strength showed that the treated sediments confer a positive effect for SCCEM. The results of the tests, the capillary absorption and the porosity accessible to water, show that the nature of the mineral addition in the SCCEM has a considerable influence on the physico-mechanical properties and the properties transfer of these mortars. SCCEMs containing treated sediments have acceptable shrinkage values that are very comparable to those obtained on fly ash mortars but slightly higher than those of reference mortars. Analyses of the microstructure provided some explanations. Overall, the partial substitution of Portland cement by 22% of the mud treated by calcination shows a real economic, environmental and technological advantage.

Key words: SCCEM - Treated sediments - Fly ash - Mechanical strengths - Plastic shrinkage - Free shrinkage - Cracking - Microstructural analyses - Transfer properties

RÉSUMÉ

Les considérations environnementales actuelles incitent à l'élaboration de nouvelles formulations de mortiers ou de bétons plus éco-respectueux. De tels matériaux doivent être caractérisés, notamment, en ce qui concerne leur utilisation dans le contexte du respect de l'environnement et de la construction durable.

Les déchets industriels ont trouvé leur place comme matériaux à part entière dans la fabrication des bétons ou des mortiers. Ces déchets comme la fumée de silice, le laitier granulé de haut fourneau, les cendres volantes, ...etc, peuvent être incorporés comme ajout minéral ou granulats fin (sable) dans les matériaux cimentaires, afin d'améliorer certaines propriétés à l'état frais ou durci. Cependant, il existe d'autres types de déchets naturels qui nécessitent d'être valorisés, à savoir les sédiments de dragage des barrages qui nécessitent un traitement par calcination pour les rendre actifs.

Le concept de mortier de béton autoplaçant équivalent (MBAPE) a été développé et validé comme outil de formulation de béton autoplaçant. Il permet notamment d'optimiser le triplet ciment /addition /adjuvant directement à l'échelle du mortier en évitant les essais lourds et fastidieux sur béton autoplaçant. À l'heure actuelle, un manque de recul persiste au regard de la maîtrise complète du comportement différé libre et empêché du mortier de béton autoplaçant équivalent contenant des sédiments traités.

Le but de cette recherche est de déterminer dans un premier temps l'influence des caractéristiques de deux additions minérales (vase traitée par calcination et cendres volantes) et du développement de leur microstructures sur les mécanismes se produisant au niveau microscopique menant au développement de la résistance mécanique (compression et flexion), du retrait à court et à long terme et à la fissuration due au retrait empêché. Dans la deuxième étape, des propriétés de transfert sont étudiées pour une tentative de prédiction du retrait et de la fissuration due au retrait empêché.

Une étude expérimentale systématique a été réalisée, sur une série de six compositions de pâtes de liant et de six compositions des mortiers de béton autoplaçant équivalent préparée avec le même pourcentage d'addition minérale (22%) mais avec deux rapports eau/liant ($E/L=0.39$ et $E/L=0.47$). L'effet de la nature du liant sur les caractéristiques à l'état frais (l'étalement et le temps de prise) et les caractéristiques à l'état durci (les résistances mécaniques, analyses microstructurales (ATG-DTG, DRX, MEB-EDS)), le retrait plastique, le retrait libre (total, endogène et de dessiccation), la fissuration due au retrait empêché et la mesure des propriétés de transfert (l'absorption capillaire, la porosité ouverte) est quantifié. L'utilisation de différentes techniques permet d'établir des relations entre le développement de la microstructure étudiée et les mesures de retraits obtenues. Aussi, l'effet du paramètre E/L sur le retrait à court et à long terme est étudié dans cette recherche.

Les résultats de la résistance à la compression ont montré que les sédiments traités confèrent un effet positif pour les MBAPE. Les résultats des essais, de l'absorption capillaire et de la porosité accessible à l'eau montrent que la nature de l'addition minérale dans les MBAPE influe considérablement sur les propriétés physico-mécaniques et les propriétés de transfert de ces mortiers. Les MBAPE contenant des sédiments traités présentent des valeurs de retrait acceptables et très comparables à celles obtenues sur des mortiers à base de cendres volantes mais légèrement supérieures à celles des mortiers de référence. Des analyses de la microstructure ont permis d'apporter quelques explications. Dans l'ensemble, la substitution partielle au CEM I par 22% de la vase traitée par calcination montre un réel avantage économique, environnemental et technologique.

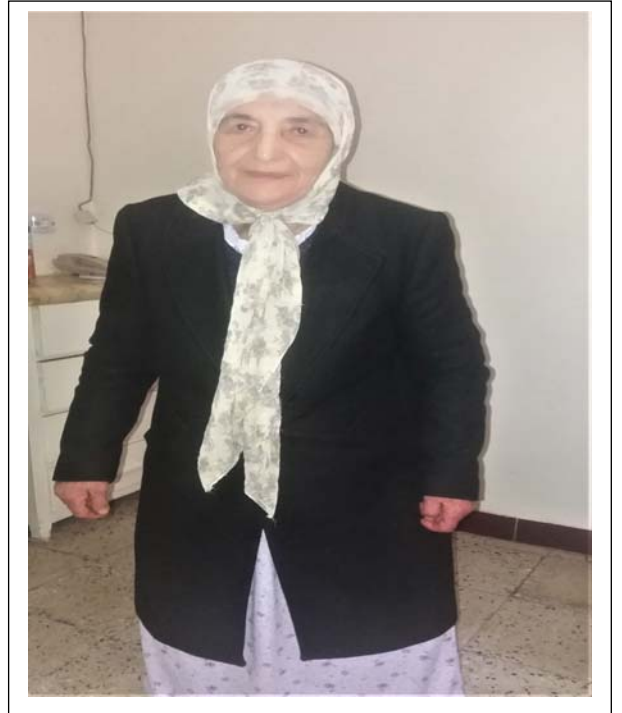
Mots clés : MBAPE - Sédiments traités - Cendres volantes - Résistances mécaniques - Retrait plastique - Retrait libre - Fissuration - Analyses microstructurales - Propriétés de transfert

DEDICACES

Louange à ALLAH le Tout Puissant de m'avoir donné la force, le courage et la volonté pour pouvoir achever ce travail.

À MA TRÈS CHÈRE MÈRE : AMMOUR Sultana

Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. Tes conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Ta patience sans fin, ta compréhension et ton encouragement sont pour moi le soutien indispensable que tu as toujours su m'apporter. Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester ta fierté et ne jamais te décevoir. En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime. Que Dieu te donne santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.



À MON TRÈS CHER PÈRE : TAIEB Abdelkader

Autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes soient-elles ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. Tu as su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Que Dieu le tout puissant te préserve, t'accorde santé, bonheur, quiétude de l'esprit et te protège de tout mal.

À MON EPOUX : KALIFA Fethi

Ton encouragement et ton soutien étaient la bouffée d'oxygène qui me ressourçait dans les moments pénibles. Merci d'être toujours à mes côtés pour donner du goût et du sens à notre vie de famille.

À MES ENFANTS : Abderrahmane, Nada, Soltana.

À MES TRÈS CHERS FRÈRES ET SŒURS : Noureddine, Charef, Mohamed, Youcef, Fouzia, Samira et Nawel.

À LA MÉMOIRE de mon frère TAIEB Ammour et ma tante AMMOUR Yamina.

À MES CHÈRES AMIES : MARADJ Samira, BELARBI Fella, BENDJARBOUE Amina, KERDEGH Fatima.

À MES BEAUX-PARENTS : KALIFA Mohamed et KRELIFA Khaldia.

À MA GRANDE FAMILLE : je cite en particulier BELKAROUB Nacera, TAYEB Yousra, TAYEB Rawnak, TAIEB Amele, SNOUSI Amina, mes tantes, mes oncles ainsi que mes cousins et cousines.

TAIEB FATIMA

REMERCIEMENTS

Au nom d'Allah Clément et Miséricordieux !

Je remercie le BON DIEU ALLAH de m'avoir donné du courage et la patience pour réaliser ce modeste travail.

J'exprime tout d'abord ma reconnaissance et mes remerciements les plus sincères à ma directrice de thèse Madame BELAS Nadia, Professeur à l'Université de Mostaganem, pour son aide et ses conseils, ainsi le soutien qu'elle m'a accordé durant ce travail.

J'adresse mes remerciements à Monsieur BENDANI Karim, professeur à l'Université de Mostaganem pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux examinateurs, Monsieur MEBROUKI Abdelkader, Professeur à l'Université de Mostaganem et Monsieur AYED Kada, Maître de Conférences A à l'ENP Maurice Audin d'Oran pour leur lecture attentive de ce mémoire.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des chercheurs :

Du laboratoire L.C.T.P.E de l'université de Mostaganem : je cite en particulier Professeur MISSOUM Hanifi, Professeur BOUHAMOU Naserdine, Professeur LAREDJ Nadia, Docteur MALIKI Moustapha, Docteur BELARIBI Omar, Docteur BELGUESMIA Khalil, Docteur SAFER Omar et Madame MOSTEFA Fouzia.

Du laboratoire IGCMO de l'Université des Sciences et de la Technologie d'ORAN : je cite en particulier Monsieur BENOUDA Hadj Hassen

Du laboratoire de la cimenterie LAFARGE à Sig-Mascara : je cite en particulier Monsieur BENABDELKADER Arabi.

Du laboratoire LGCGM d'IUT et INSA de Rennes : je cite en particulier Monsieur MESBAH Habib-Abdelhak, HAMZE Samah et MAZHOUD Ibrahim.

Du laboratoire La SIE de l'université de La Rochelle : je cite en particulier Monsieur HAMAMI Ameer Amine, Professeur BELARBI Rafik, CHERIF Rachid, BOUKHELF Fouad, AKLOUCHE Leila et Ferhat.

Du laboratoire GeM de l'école centrale de Nantes : je cite en particulier Professeur LOUKILI Ahmed, Monsieur TAHLAITI Mahfoud, DJAAFRI Reda et SOUAYFEN Faten.

Du Laboratoire Technologie et Propriétés du Solide de l'Université de Mostaganem : Monsieur CHOUAIIH Abdelkader et BELKAFOUF Nourelhouda.

Ainsi qu'à Mr EZZIANE Mohammed, à Mr GHERNOUTI Youcef, à Mr KHELIFA Belkacem, à Mr CHEBAB Madjid, à tous les doctorants de ma promotion (2015-2016) et à tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près pour la réalisation de ce mémoire, je vous dis merci.

MERCI

SOMMAIRE

ملخص.....	i
ABSTRACT.....	ii
RÉSUMÉ.....	iii
DÉDICACES.....	iv
REMERCIEMENTS.....	v
SOMMAIRE.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES TABLEAUX.....	xxii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1

PARTIE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I. LES MORTIERS DE BÉTON AUTOPLAÇANT ÉQUIVALENT (MBAPE)

I.1. INTRODUCTION.....	4
I.2. MÉTHODE MBE DE SÉLECTION DES ADJUVANTS.....	5
I.2.1. Rappel des hypothèses de base de la méthode MBE.....	6
I.2.2. Corrélation MBE / béton.....	7
I.2.3. Principe de surface développée par les granulats.....	11
I.2.4. Calcul des surfaces développées par les granulats.....	11
I.2.5. Calcul de la composition du mortier de béton équivalent.....	14
I.2.6. Utilisation de la méthode MBE.....	16
I.2.7. Limites de l'utilisation de la méthode MBE.....	17
I.3. CARACTÉRISATION DU MBAPE À L'ÉTAT FRAIS.....	19
I.3.1. Essais de l'étalement au mini cône.....	19
I.4. PRINCIPAUX CONSTITUANTS DES MBAPE.....	19
I.4.1. Le ciment.....	19
I.4.2. Le sable.....	22
I.4.3. Les adjuvants.....	23
I.4.4. Les additions minérales.....	26
I. 4.4.1. Les sédiments de dragage (Vase).....	26
I. 4.4.2. Les cendres volantes.....	29

I.5. ÉTUDES DE L'INFLUENCE DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES PROPRIÉTÉS DES MORTIERS ET DES BAP.....	31
I.5.1. Études de l'influence des additions minérales sur les propriétés des mortiers et des BAP à l'état frais.....	32
I.5.1.1. Influence des sédiments de dragage (vase)	32
I.5.1.2. Influence des cendres volantes.....	36
I.5.2. Études sur l'influence des additions minérales sur les propriétés mécaniques des mortiers et des BAP.....	37
I.5.2.1. Influence des sédiments traités et des cendres volantes sur les résistances mécaniques... 37	
I.5.2.2. Influences des sédiments traités et des cendres volantes sur le retrait	44
I.6. CONCLUSION	45
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	47
CHAPITRE II. COMPORTEMENT DIFFÉRÉ LIBRE ET EMPÊCHÉ	
II.1. INTRODUCTION	54
II.2. RISQUE DE FISSURATION AU JEUNE ÂGE	54
II.2.1. Retrait plastique	55
II.2.1.1. Origine	55
II.2.1.2. Conséquence	59
II.2.1.3. Facteurs et prévention.....	61
II.2.1.4. Techniques de mesures du retrait plastique	61
II.2.2. Retrait thermique	64
II.2.3. Dispositifs de fissuration à l'état frais	65
II.3. DÉFORMATIONS DIFFÉRÉES LIBRES	66
II.3.1. Le retrait libre	66
II.3.1.1. Le retrait endogène	67
II.3.1.2. Le Retrait de dessiccation.....	72
II.3.1.3. Retrait de carbonatation.....	75
II.3.1.4. Tendances et facteurs influents.....	76
II.4. DÉFORMATIONS EMPÊCHÉES.....	77
II.4.1. Le retrait empêché	77
II.4.1.1. Phénomène étudié et caractérisation.....	77

II.4.1.2. Techniques de mesures du retrait empêché	77
II.4.1.3. Tendances et facteurs influents.....	80
II.5. CONCLUSION	80
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	82
CHAPITRE III. LES PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT	
III.1. INTRODUCTION.....	91
III.2. POROSITÉ ET PROPRIÉTÉS DU RÉSEAU POREUX.....	91
III.2.1. Description de la structure poreuse d'un matériau	91
III.2.2. Les méthodes de caractérisation de la structure poreuse des matériaux.....	93
III.2.3. Structure poreuse de la pâte de ciment	94
III.2.4. Influence de la composition.....	95
III.2.5. Influence des additions minérales.....	96
III.2.6. Propriétés du réseau poreux.....	98
III.3. PHÉNOMÈNES DE TRANSFERT.....	100
III.3.1. Absorption capillaire	100
III.3.1.1 Influence des additions minérales (cendres volantes et vase calcinée).....	101
III.4. CONCLUSION	103
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	104
CHAPITRE IV. LES SÉDIMENTS DE DRAGAGE DES BARRAGES	
IV.1 INTRODUCTION	106
IV.2. ORIGINE ET NATURE DES SÉDIMENTS	106
IV.3. COMPOSITION DES SÉDIMENTS (VASES).....	107
IV.4. GRANULOMÉTRIE DES SÉDIMENTS	109
IV.5. ENVASEMENT DES BARRAGES.....	110
IV.6. LES TECHNIQUES DE DÉVASEMENT	111
IV.7. LES TECHNIQUES DE DRAGAGE DISPONIBLES	113
IV.8. ÉTAT DE L'ART SUR LA VALORISATION DES SÉDIMENTS DANS LE GÉNIE-CIVIL	113
IV.8.1. Valorisation des sédiments dans le béton et le mortier	114
IV.8.2. Valorisation des sédiments dans la fabrication du ciment	120

IV.8.3. Valorisation des sédiments dans la fabrication de briques.....	122
IV.8.4. Valorisation des sédiments dans la construction des routes.....	123
IV.9. PRÉSENTATION DU BARRAGE DE CHORFA II.....	123
IV.10. CONCLUSIONS.....	127
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	128
PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	132

PARTIE II. MATÉRIAUX ET PROGRAMME EXPERIMENTAL

CHAPITRE I. MATÉRIAUX

I.1. INTRODUCTION	134
I.2. MATÉRIAUX.....	134
I.2.1. Ciment.....	134
I.2.2. Sable.....	135
I.2.3. Additions minérales.....	136
I.2.3.1. Vase	136
I.2.3.2. Cendres volantes.....	141
I.2.4. Adjuvant.....	143
I.3. FORMULATIONS DES MBAPE UTILISÉES	144
I.4. FORMULATIONS DES PÂTES DE LIANT ÉTUDIÉES	145
I.5. CONCLUSION.....	146
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	147

CHAPITRE II. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

II.1. INTRODUCTION	148
II.2. ESSAIS DE CARACTÉRISATION DE MBAPE À L'ÉTAT FRAIS	151
II.2.1. Essai d'étalement (Slump flow).....	151
II.2.2. Temps de prise	151
II.3. ESSAIS DE CARACTÉRISATION MICROSTRUCTURALE DES PÂTES DE LIANT ÉTUDIÉES.....	152
II.3.1. Mesure thermique de la teneur en eau libre et liée	152
II.3.2. Analyse par DRX.....	153

II.3.3. Analyse thermogravimétrique ATG	155
II.3.3.1. Exploitations des thermogrammes	158
II.3.4. Analyse par MEB-EDS	159
II.4. ESSAIS DE CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT DES MBAPE	160
II.4.1. Essai de porosité accessible à l'eau	160
II.4.2. Essai d'absorption capillaire	161
II.5. ESSAIS DE CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DES MBAPE	162
II.5.1. Indices et coefficients d'activité pouzzolanique des additions minérales	162
II.5.2. Mesure de la résistance à la compression et à la flexion	163
II.5.3. Essai de retrait plastique	164
II.5.4. Essai de retrait libre (total, endogène et de dessiccation)	166
II.5.5. L'âge et la largeur de la fissuration des MBAPE	167
II.6. CONCLUSION	169
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	170
PARTIE III. ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	
CHAPITRE I. RÉSULTATS ET ANALYSE DE L'ÉTAT FRAIS ET DE LA MICROSTRUCTURE	
I.1. INTRODUCTION	173
I.2. CARACTÉRISATION DES MBAPE À L'ÉTAT FRAIS	173
I.2.1. Influence des additions minérales sur l'étalement	173
I.2.2. Influence des additions minérales sur le temps de prise	174
I.3. INFLUENCE DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LA MICROSTRUCTURE DES PÂTES DE LIANT	176
I.3.1. Évolution de la teneur en eau liée et libre	176
I.3.2. Analyse DRX	179
I.3.3. Analyse thermogravimétrique ATG-DTG	182
I.3.4. Analyse MEB-EDS	185
I.4. CONCLUSION	192
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	193

CHAPITRE II. RÉSULTATS ET ANALYSE DES RÉSISTANCES MÉCANIQUES	
II.1. INTRODUCTION	195
II.2. INDICE D'ACTIVITÉ DE LA VASE CALCINÉE ET DES CENDRES VOLANTES	195
II.3. INFLUENCE DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION.....	196
II.4. INFLUENCE DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LA RÉSISTANCE À LA FLEXION.....	203
II.5. CORRÉLATION ENTRE LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION ET À LA FLEXION.....	209
II.6. CONCLUSION	210
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	212
CHAPITRE III. RÉSULTATS ET ANALYSE DES PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT	
III.1. INTRODUCTION.....	214
III.2. EFFET DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LA POROSITÉ ACCÉSSIBLE À L'EAU DES MBAPE.....	214
III.3. EFFET DES ADDITIONS MINÉRALES SUR L'ABSORPTION CAPILLAIRE (LA SORPTIVITÉ) DES MBAPE	219
III.4. CONCLUSION	222
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	223
CHAPITRE IV. RÉSULTATS ET ANALYSE DU COMPORTEMENT DIFFÉRÉ LIBRE ET LA FISSURATION	
IV.1. INTRODUCTION	224
IV.2. RETRAIT AU TRÈS JEUNE ÂGE-RETRAIT PLASTIQUE LIBRE DANS DES CONDITIONS DE SÉCHAGE.....	224
IV.3. INFLUENCE DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LE RETRAIT LIBRE (TOTAL, ENDOGENE ET DE DESSICCATION).....	230
IV.3.1. Influence des additions minérales sur le retrait total en fonction du temps	230
IV.3.2. Effet du rapport E/L sur le retrait total en fonction du temps	232
IV.3.3. Influence des additions minérales sur le retrait endogène en fonction du temps ...	233
IV.3.4. Effet du rapport E/L sur le retrait endogène en fonction du temps	236
IV.3.5. Influence des additions minérales sur le retrait de dessiccation en fonction du temps	237

IV.3.6. Effet du rapport E/L sur le retrait de dessiccation en fonction du temps	240
IV.3.7. Influence des additions minérales sur la perte de masse en fonction du temps	241
IV.3.7.1. Perte de masse totale.....	241
IV.3.7.2. Perte de masse endogène	243
IV.3.8. Effet du rapport E/L sur la perte de masse totale en fonction du temps.....	245
IV.3.9. Effet du rapport E/L sur la perte de masse endogène en fonction du temps	246
IV.3.10. Influence des additions minérales sur retrait de dessiccation en fonction de la variation de la masse.....	247
IV.3.11. Effet du rapport E/L sur le retrait de dessiccation en fonction de la variation de la masse	250
IV.4. INITIATION ET DÉVELOPPEMENT DE FISSURES PAR L'ESSAI DE RETRAIT EMPÊCHÉ	251
IV.5. CONCLUSION.....	253
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	255
CONCLUSION GENERALE.....	259
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	264
ANNEXES	265

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I. LES MORTIERS DE BÉTON AUTOPLAÇANT ÉQUIVALENT (MBAPE)

Figure I.1. Passage du béton au MBE	7
Figure I.2. Corrélation étalement MBE / affaissement béton	8
Figure I.3. Cône d'Abrams et mini-cône.....	8
Figure I.4. Étalement du MBE en fonction du l'étalement du BAP	9
Figure I.5. Relation entre les diamètres finaux d'étalement - Béton / MBE.....	10
Figure I.6. Relations entre les temps d'écoulement à l'entonnoir des bétons et de leurs MBE respectifs.....	10
Figure I.7. Correspondance entre les ratios H2/H1 aux échelles béton et MBE.....	11
Figure I.8. Comparaison de l'efficacité de plusieurs adjuvants dont le dosage est optimisé sur le maintien de rhéologie du MBE	17
Figure I.9. Photo de la plaque pour mesure d'étalement au cône MBE.....	19
Figure I.10. Retrait à 28 jours en fonction de la finesse de mouture (cm ² /g) et de la teneur en C3S du clinker.....	21
Figure I.11. Proportionnalité du retrait à 28 jours avec la teneur en C3A du clinker et la finesse de mouture du ciment.....	21
Figure I.12. Évolution du retrait à 28 jours en fonction du contenu en laitier	22
Figure I.13. Courbe de détermination du point de saturation pour différentes combinaisons ciment-superplastifiants pour un coulis de rapport E/C=0.35.....	25
Figure I.14. Courbe de détermination du point de saturation pour différentes combinaisons ciment-pouzzolane naturelle -superplastifiants pour un coulis de rapport E/C=0.35	25
Figure I.15. Morphologie de la vase du barrage de Chorfa II (Algérie) observée au microscope électronique à balayage, (laboratoire La SIE- Université de La Rochelle-France) : a) vase brute, grossissement 2042x b) vase calcinée, grossissement 1000x	27
Figure I.16. La taille des particules de la vase calcinée du barrage de Chorfa II (ouest algérien) observée au microscope électronique à balayage, grossissement 6000x (Société CRAPC-Tipaza-Algérie).....	28
Figure I.17. Morphologie de cendres volantes silico-alumineuses observée au microscope électronique à balayage, grossissement 2000x.....	30
Figure I.18. Etalement et taux de remplissage des BAP	34

Figure I.19. Taux de ségrégation et temps d'écoulement des BAP	35
Figure I.20. Diagramme des diamètres d'étalement en fonction du pourcentage du superplastifiant	36
Figure I.21. Résistances en compression des différents mortiers en fonction de l'âge.....	37
Figure I.22. Courbes des résistances mécaniques à la compression des différences en fonction de l'âge de conservation.....	39
Figure I.23. Effet du temps de calcination sur la résistance à la compression.....	40
Figure I.24. Relation entre la résistance et le taux de substitution à maturation de sept, 28 et 60 jours	41
Figure I.25. Relation entre la résistance et le rapport E / L pour chaque taux de substitution à 28 jours.....	42

CHAPITRE II. COMPORTEMENT DIFFÉRÉ LIBRE ET EMPÊCHÉ

Figure II.1. Consolidation d'une pâte de ciment : a) Sédimentation des grains solides) b) Apparition d'une couche d'eau à la surface (ressuage).....	56
Figure II.2. Ménisques entre grains de ciment provoqués par un séchage de la surface	56
Figure II.3. Représentation schématique d'un ménisque au cours du séchage.....	57
Figure II.4. Évolution microstructurale d'une pâte de ciment	58
Figure II.5. a) Développement du retrait plastique, du tassement et de l'évaporation pour des conditions sans vent (mélange BAP3) b) Évolution du retrait plastique, du tassement et du taux d'évaporation au cours du temps (PI : prise initiale).....	59
Figure II.6. Schématisation de la fissuration à l'état frais, en termes de retrait et capacité de déformation.	60
Figure II.8. Exemple de cure par aspersion d'eau en surface d'une dalle coulée en été.....	61
Figure II.9. a) Le banc de mesure du retrait plastique b) Coupe du moule de retrait plastique	63
Figure II.10. Schéma du dispositif de la mesure de la perte de masse.....	63
Figure II.11. Présentation de dispositif de la mesure de la pression capillaire	64
Figure II.12. a) Vue en coupe du dispositif de fissuration des mortiers, b) Dispositif de fissuration pour mortier à l'état frais.....	65
Figure II.13. a) Dispositif de fissuration pour béton à l'état frais, b) Vue en coupe du dispositif de fissuration des bétons.....	66
Figure II.14. Schéma de la contraction Le Chatelier.....	68

Figure II.15. Évolution de l'humidité interne de pâte de ciment de différents E/C.....	68
Figure II.16. Évolution du retrait endogène comparé à la contraction Le Chatelier.....	70
Figure II.17. Dispositif expérimental de mesure des variations volumiques.....	71
Figure II.18. Dispositifs de mesure de retrait endogène linéique a) verticale b) Horizontal ..	71
Figure II.19. Autocontraintes de structure dues au retrait de séchage cité par[65].....	73
L'intensité du retrait de dessiccation dépend bien sûr des paramètres de formulation du matériau, comme les granulats (qui s'opposent au retrait), mais surtout du rapport E/C.....	73
Figure. II.20. Évolution de l'humidité relative interne stabilisée due à l'autodessiccation en fonction de la résistance moyenne en compression	74
Figure II.21. Relation retrait de dessiccation /perte en poids, exemple de deux bétons	75
Figure II.22. Dispositif d'essai de retrait empêché sur échantillons en plaques	78
Figure II.23. Dispositif de retrait empêché linéique.....	79
Figure II.24. Schéma de dispositif expérimental de l'essai à l'anneau	80

CHAPITRE III. LES PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT

Figure III.1. Description schématique d'un matériau poreux	92
Figure III.2. Mise en évidence, par porosimétrie mercure, des pores capillaires et des pores des hydrates, d'après [7].....	94
Figure III.3. Effet du dosage en eau sur la distribution de la taille des pores des pâtes de ciment et mortiers : a) sans addition et superplastifiant b) avec addition et superplastifiant... 95	95
Figure III.4. Évolution de la porosité de la pâte en fonction du rapport $E_{eff}/liant_{eq}$	96
Figure III.5. Influence de l'addition de cendres volantes sur l'évolution de la structure porosimétrique des pâtes de ciment au cours du temps	97
Figure III.6. Influence de l'addition de la vase calcinée sur l'évolution de la porosité accessible à l'eau des différents bétons vibrés à 28 jours de conservation	98
Figure III.7. Influence de l'addition de la vase calcinée sur la porosité totale des BAP à 90 jours de conservation.....	98
Figure III.8. Volume cumulé des pores des BAP à base de vase calcinée.....	100
Figure III.9. Valeurs de sorptivité dans les différents milieux de conservation.....	101
Figure III.10. Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés (REF)	102

Figure III.11. Coefficients de sorptivité des différents bétons contenant de vase, essai réalisé après 28 jours de conservation 103

CHAPITRE IV. LES SÉDIMENTS DE DRAGAGE DES BARRAGES

Figure IV.1. Engin mécanique de dragage 112

Figure IV.2. Opération de dragage du barrage de Fergoug en 2007 112

Figure IV.3. Dragage activant dans la retenue du barrage Foug-El-Gherza (Biskra)..... 113

Figure IV.4. Évolution des résistances à la compression en fonction du temps et du dosage en vase..... 115

Figure IV.5. Évolution du retrait endogène (a) et de dessiccation (b) en fonction du temps et des dosages en vase 115

Figure IV.6. Comparaison des évolutions des résistances en compression des mortiers à (10%,20% et 30%) de vase de Chorfa, de Fergoug et de pouzzolane naturelle..... 116

Figure IV.7. Résistances à la compression des bétons en MPa en fonction du temps 117

Figure IV.8. Courbes d'évolution des résistances à la compression des BAP..... 118

Figure IV.9. Évolution du retrait endogène (a) et total (b) en fonction du temps des BAP... 118

Figure IV.10. Évolution de la résistance à la compression des BAP 119

Figure IV.11. Évolution du retrait endogène (a) et total (b) en fonction du temps des BAP. 119

Figure IV.12. Situation donnée par satellite du barrage Chorfa II 124

Figure IV.13. Situation géographique de la ville de Mascara et du barrage de Chorfa II..... 124

Figure IV.14. Situation géographique du barrage de Chorfa II. 124

Figure IV.15. Vue générale du barrage Chorfa II 125

Figure IV.16. La digue du barrage Chorfa II 125

Figure IV.17. Vue du côté interne de la digue du barrage Chorfa II 126

Figure IV.18. Vue du côté interne de la digue du barrage Chorfa II 126

Figure IV.19. (a) Vanne du barrage Chorfa II (b) Envasement du côté interne du barrage Chorfa II. 126

CHAPITRE I. MATÉRIAUX

Figure I.1. Courbe granulométrique du sable..... 135

Figure I.2. Granulométrie laser de la vase brute, calcinée et des cendres volantes 136

Figure I.3. Analyse MEB et EDS de la vase brute, grossissement 1000× 137

Figure I.4. Analyse thermogravimétrique de la vase brute	137
Figure I.5. a) séchage à 50°C b) concassage et broyage c) tamisage à 80µm d) calcination à 750°C pendant 5 heures.....	138
Figure I.6. a) vase brute b) vase séchée c) vase broyée d) vase tamisée e) vase calcinée.....	138
Figure I.7. Diffraction aux rayons X: a) vase brute b) vase calcinée	139
Figure I.8. Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques EDS de la vase calcinée d'une surface 300x300 µ ² , grossissement 500×	140
Figure I.9. Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques de la vase calcinée (les spots), grossissement 1000×.....	140
Figure I.10. Analyse thermogravimétrique de la vase calcinée	141
Figure I.11. Analyse MEB et EDS des cendres volantes d'une surface 70x60 µ ² , grossissement 2000×	142
Figure I.12. Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques EDS des cendres volantes (le spot), grossissement 500×	142
Figure I.13. Analyse thermogravimétrique des cendres volantes (laboratoire LaSie, université de La Rochelle)	143

CHAPITRE II. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Figure II.1. Représentation schématique des essais des pâtes de liant.....	149
Figure II.2. Représentation schématique des essais des MBAPE	150
Figure II.3. Essai d'étalement des MBAPE étudiés	151
Figure II.4. Appareil VICAT automatique classique	152
Figure II.5. a) Four (Température maximale 3000° C) b) Dessiccateur	153
Figure II.6. Schéma d'un diffractomètre	154
Figure II.7. a) Broyeur b) Diffractomètre de marque D4 ENDEAVOR.....	155
Figure II.8. Schéma d'un appareil d'ATG (type Setaram-SETSIS Evolution 16/18).....	156
Figure II.9. Appareil d'ATG (type Setaram-SETSIS Evolution	157
Figure II.10. Exemple des principaux pics DTG pour un mélange à base de ciment et de fines calcaires	157
Figure II.11. Microscope électronique à balayage de type FEI Quanta 200 ESEM/FEG Environnemental	160
Figure II.12. Essai de porosité : a) Dessiccateur b) Pesée hydrostatique.....	161

Figure II.13. Dispositif expérimental pour l'essai d'absorption d'eau par capillarité	162
Figure II.14. Dispositif pour les essais des résistances mécaniques	164
Figure II.15. Dispositif de mesure de retrait plastique (laboratoire GeM de l'école centrale de Nantes)	165
Figure II.16. Mesure du retrait plastique des MBAPE de cette étude.....	165
Figure II.17. Dispositif de la mesure en continue de la perte de masse	166
Figure II.18. Mesure du retrait des MBAPE (laboratoire LGCGM à IUT de Rennes) : a) retrait total, b) retrait endogène.....	167
Figure II.19. Mesure le poids des MBAPE : a) poids total b) poids endogène.....	167
Figure II.20. Géométrie de l'anneau en acier et en mortier utilisés dans cette étude.....	168
Figure II.21. Anneaux de mortier de cette étude.....	169
Figure II.22. La fissuration de l'anneau du mortier avec l'installation du capteur de fissure	169

CHAPITRE I. RÉSULTATS ET ANALYSE DE L'ÉTAT FRAIS ET DE LA MICROSTRUCTURE

Figure I.1. Variation d'étalement des MBAPE étudiés.....	174
Figure I.2. Les temps de début de prise, de fin de prise et le temps de prise des MBAPE étudiés.....	176
Figure I.3. Teneur en eau liée de pâtes étudiées.....	177
Figure I.4. Teneur en eau libre de pâtes étudiées	178
Figure I.5. Teneur en CO ₂ de pâtes étudiées	179
Figure I. 6. Diffraction aux rayons X des pâtes de liant étudiés : a) PT0.39, b) PVC 0.39, c) PCV 0.39, d) PT 0.47, e) PVC 0.47, f) PCV 0.47	181
Figure I.7. Analyse thermogravimétrique des pâtes de liant étudiées.....	183
Figure I.8. Évolution de la masse des pâtes de liant au cours de l'ATG.....	183
Figure I.9. Dérivées des pertes de masse des pâtes de liant étudiées	184
Figure I.10. Images SE et BSE de la microstructure de PT 0.39, grossissement 4000×.....	186
Figure I.11. Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques de PT 0.39 d'une surface 480x390 μ ² , grossissement 300 x.....	186
Figure I.12. Images SE et BSE de la microstructure de PVC 0.39, grossissement 4000×	187

Figure I.13. Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques de PVC 0.39 d'une surface $480 \times 390 \mu^2$, grossissement $300 \times$ 187

Figure I.15. Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques de PCV 0.39 d'une surface $480 \times 390 \mu^2$, grossissement $300 \times$ 188

Figure I.14. Images SE et BSE de la microstructure de PCV 0.39, grossissement $4000 \times$ 188

Figure I.16. (1) : Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques de PT 0.47 d'une surface de $300 \times 300 \mu^2$, grossissement $500 \times$, (2) : Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques du spot, grossissement $500 \times$ 189

Figure I.17. Images SE et BSE de la microstructure de PVC 0.47, grossissement $4000 \times$ 190

Figure I.18. Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques EDS de PVC 0.47 d'une surface $480 \times 390 \mu^2$, grossissement $300 \times$ 190

Figure I.19. (1) : Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques EDS de PCV 0.47 d'une surface $480 \times 390 \mu^2$, grossissement $300 \times$, (2) : Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques du spot, grossissement $4000 \times$ 191

CHAPITRE II. RÉSULTATS ET ANALYSE DES RÉSISTANCES MÉCANIQUES

Figure II.1. Indice d'activité de la vase calcinée et des cendres volantes 196

Figure II.2. Évolution des résistances à la compression en fonction du temps..... 198

Figure II.3. Histogramme d'évolution des résistances à la compression en fonction de la nature de liant et du rapport E /L..... 199

Figure II.4. Histogramme évolution de R_{cj} par rapport à R_{c28} 202

Figure II.5. Évolution de la fraction des résistances en compression des MBAPE à base des ajouts minéraux par rapport au MBAPE témoin..... 203

Figure II.6. Évolution des résistances à la flexion au cours du temps 205

Figure II.7. Histogramme d'évolution des résistances à la flexion de la nature du liant et du rapport E/L 206

Figure II.8. Évolution de la fraction des résistances en flexion des MBAPE par rapport au MBAPE à 28 jours de même MBAPE 207

Figure II.9. Évolution de la fraction des résistances en flexion des MBAPE à base des ajouts minéraux par rapport au MBAPE témoin 209

Figure II.10. Corrélation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression des MBAPE étudiés..... 209

CHAPITRE III. RÉSULTATS ET ANALYSE DES PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT

Figure III.1. Porosité accessible à l'eau des différents mortiers d'étude, essai réalisé après 28 jours de cure	215
Figure III.2. Variation de la teneur en eau libre en fonction de la porosité ouverte avec $E/L=0.39$	216
Figure III.3. Variation de la teneur en eau libre en fonction de la porosité ouverte avec $E/L=0.47$	217
Figure III.4. Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité ouverte avec les deux rapports E/L	218
Figure III.5. Variation de la résistance à la flexion en fonction de la porosité ouverte avec les deux rapports E/L	218
Figure III.6. Coefficients de sorptivité des différents mortiers d'étude, essai réalisé après 28 jours de conservation.....	219
Figure III.7. Coefficients de sorptivité des différents mortiers à l'échéance 24 heures.....	220
Figure III.8. La variation de la résistance à la compression en fonction de coefficient de sorptivité à l'échéance 24 h.....	221

CHAPITRE IV. RÉSULTATS ET ANALYSE DU COMPORTEMENT DIFFÉRÉ LIBRE ET LA FISSURATION

Figure IV.1. Mesure de retrait plastique des MBAPE avec le rapport $E/L=0.39$ en conditions de dessiccation.....	225
Figure IV.2. Mesure de retrait plastique des MBAPE avec le rapport $E/L=0.47$ en conditions de dessiccation.....	226
Figure IV.3. Mesure de retrait plastique des MBAPE étudiés en conditions de dessiccation avec les deux rapports E/L	227
Figure IV.4. Mesure de taux d'évaporation des MBAPE avec $E/L =0.39$	228
Figure IV.5. Mesure de taux d'évaporation des MBAPE avec $E/L=0.4$	229
Figure IV.6. Mesure de taux d'évaporation des MBAPE avec les deux rapports E/L	230
Figure IV.7. Évolution de retrait total des MBAPE du Rapport $E/L=0.39$	231
Figure IV.8. Évolution de retrait total des MBAPE du rapport $E/L=0.47$	232
Figure IV.9. Évolution de retrait total des MBAPE avec les deux rapports E/L	233
Figure IV.10. Évolution de retrait endogène des MBAPE du rapport $E/L=0.39$	235
Figure IV.11. Évolution de retrait endogène des MBAPE du rapport $E/L=0.47$	236
Figure IV.12. Évolution de retrait endogène des MBAPE avec les deux rapports E/L	237

Figure IV.13. Évolution de retrait de dessiccation des MBAPE du rapport E/L=0.39	239
Figure IV.14. Évolution de retrait de dessiccation des MBAPE du rapport E/L=0.47	240
Figure IV.15. Évolution de retrait de dessiccation des MBAPE avec les deux rapports E/L	241
Figure IV.16. Évolution de la perte de masse totale des MBAPE en fonction de temps avec le rapport E/L=0.39	242
Figure IV.17. Évolution de la perte de masse totale des MBAPE en fonction de temps avec le rapport E/L=0.47	243
Figure IV.18. Évolution de la perte de masse endogène des MBAPE en fonction de temps avec le rapport E/L=0.39	244
Figure IV.19. Évolution de la perte de masse endogène des MBAPE en fonction de temps avec le rapport E/L=0.47	245
Figure IV.20. Évolution de la perte de masse totale des MBAPE en fonction de temps avec les deux rapports E/L	246
Figure IV.21. Évolution de la perte de masse endogène des MBAPE en fonction de temps avec les deux rapports E/L (0.39 et 0.47)	247
Figure IV.22. Retrait de dessiccation en fonction de la variation de la masse de MBAPE du rapport E/L=0.39	248
Figure IV.23. Retrait de dessiccation en fonction de la variation de la masse de MBAPE avec le rapport E/L=0.47	249
Figure IV.24. Retrait de dessiccation en fonction de la variation de la masse de MBAPE avec les deux rapports E/L	250
Figure IV.25. Mesure des largeurs des fissures par le capteur de fissure	252

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I. LES MORTIERS DE BÉTON AUTOPLAÇANT ÉQUIVALENT (MBAPE)

Tableau I.1. Exemple de gravillons du béton	12
Tableau I.2. Composition du béton et caractéristique physiques	15
Tableau I.3. Composition du MBE corrigé par les sables du béton	15
Tableau I.4. Composition du MBE suivant le type de correction.....	16
Tableau I.5. Composition chimique de la vase calcinée (% massique).....	27
Tableau I.6. Composition chimique des cendres volantes silico-alumineuses et silico-calciques (% massique)	30
Tableau I.7. Dosages du plastifiant des mortiers à base de vase calcinée de Chorfa et Fergoug.....	33
Tableau I.8. Résistance à la compression des BAP (SCC) à base de la cendre volante et des BOV (NC).....	44

CHAPITRE IV. LES SÉDIMENTS DE DRAGAGE DES BARRAGES

Tableau IV.1. Classement granulométrique des sédiments.....	110
---	-----

CHAPITRE I. MATÉRIAUX

Tableau I.1. Composition minéralogique du clinker	135
Tableau I.2. Composition chimique du ciment.....	135
Tableau I.3. Caractéristiques physiques de la vase calcinée	138
Tableau I.4. La composition chimique de la vase calcinée	139
Tableau I.5. Caractéristiques physiques des cendres volantes	141
Tableau I.6. Composition chimique des cendres volantes.....	142
Tableau I.7. Composition des MBAPE	144
Tableau I.8. Séquence de malaxage des MBAPE étudiés	145
Tableau I.9. Composition des pâtes de liant étudiées.....	145

CHAPITRE I. RÉSULTATS ET ANALYSE DE L'ÉTAT FRAIS ET DE LA MICROSTRUCTURE

Tableau I.1. Récapitulatif des résultats d'étalement des MBAPE étudiés	173
Tableau I. 2. Récapitulatif des résultats de temps de prise des MBAPE étudiés	174

Tableau I.3. Teneur en eau libre, en eau liée et en CO₂ mesurées sur des pâtes d'étude... 176
Tableau I.4. Pertes de masses des pâtes de liant de l'étude 184

CHAPITRE II. RÉSULTATS ET ANALYSE DES RÉSISTANCES MÉCANIQUES

Tableau II.1. Indices et coefficients d'activité des additions utilisées 195
Tableau II.2. Valeurs des résistances à la compression des MBAPE étudiés 197
Tableau II.3. Cinétique de développement des résistances à la compression 201
Tableau II.4. Rapports des résistances à la compression R_{cj} (MBAPE (VC, CV)) / R_{cj} (MBAPET) 202
Tableau II.5. Valeurs des résistances à la flexion des MBAPE étudiés 204
Tableau II.6. Cinétique de développement des résistances à la flexion 207
Tableau II.7. Rapport des résistances à la compression R_{fj} (MBAPE (VC, CV)) / R_{fj} (MBAPET) 208

**CHAPITRE IV. RÉSULTATS ET ANALYSE DU COMPORTEMENT DIFFÉRÉ
LIBRE ET LA FISSURATION**

Tableau IV.1. Résultats des différents retraits sur les mortiers étudiés à 350 jours 254

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le mortier de béton autoplaçant équivalent (MBAPE) se caractérise par une grande fluidité et une grande capacité de remplissage tout en étant stable et garantissant de bonnes performances mécaniques et de retrait. De telles caractéristiques sont directement liées à sa composition. En effet, les recherches menées, au cours des dernières années, montrent que les MBAPE sont formulés différemment des mortiers ordinaires : ils contiennent plus d'éléments fins qui doivent comporter au moins une addition minérale et un dosage élevé en superplastifiant. Le concept de mortier de béton autoplaçant équivalent a été développé et validé comme outil de formulation de béton autoplaçant. Il permet notamment d'optimiser le triplet ciment /addition /adjuvant directement à l'échelle du mortier en évitant les essais lourds et fastidieux sur béton autoplaçant. Le concept est basé sur la conservation de la surface granulaire entre les deux échelles, les conditions de contact entre la pâte (eau + ciment + adjuvants + additions minérales) et les granulats peuvent ainsi apparaître conservées. Le concept semble a priori applicable aux BAP, pour prévoir ses évolutions d'étalement à partir de celles de son MBAPE si les dosages en superplastifiant ou l'âge varient.

Par ailleurs, en Algérie, la plupart des bétons autoplaçants ou des mortiers autoplaçants sont exclusivement fabriqués avec les fillers calcaires ou de la pouzzolane naturelle. En effet, beaucoup de régions du pays souffrent du phénomène de l'envasement des barrages qui constitue un enjeu d'envergure nationale. Ces barrages se transforment beaucoup plus en réceptacles de vase que d'eau. A cet effet, les possibilités d'utilisation des sous-produits issus des opérations de dragage sont réelles et touchent de nombreuses applications, d'autres déchets naturels ont été valorisés ces dernières années en tant que matériaux substituables en partie au ciment tels que les sédiments de dragage. En outre, la protection de l'environnement, la connaissance des problématiques liées au comportement différé libre des matériaux cimentaires, des fissurations à long terme peuvent apparaître sans qu'on puisse a priori les expliquer, l'impact sur les coûts, sont également des facteurs qui encouragent à chercher d'autres types d'additions minérales telles que les sédiments entrant dans la formulation des MBAPE. L'interaction entre la formulation des mortiers et leur comportement différé libre (retrait) est donc une problématique récurrente qui sera traitée ici dans le cadre de l'optimisation de la composition des MBAPE.

C'est pourquoi, les sédiments de dragage des barrages, se présentent comme une alternative attirante du point de vue technique, économique et écologique pour la formulation des mortiers autoplaçants.

Pour ces raisons, la présente recherche examine l'effet de l'incorporation de la vase du barrage de Chorfa II situé au niveau de la wilaya de Mascara, sur le retrait à court et à long terme des MBAPE. Sachant que cette vase est transformée, par un procédé thermique (calcination à 750°C pendant 5 heures) pour la rendre active.

Plan de mémoire

Ce travail s'articule en trois parties :

La première partie de cette thèse est consacrée à l'étude bibliographique. Cette étude est composée de quatre chapitres. Dans **le premier chapitre**, nous présentons des généralités sur les MBAPE ainsi que l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés à l'état frais et sur les caractéristiques physico-mécaniques de ces mortiers. Les recherches publiées concernant l'influence du type d'addition minérale sur le retrait des BAP ou des MBAPE sont également présentés dans ce chapitre. Dans **le deuxième chapitre** nous avons abordé le comportement différé libre et empêché de ces mortiers (quelques aspects sur les formes ou types de retrait tels que : retrait au très jeune âge, retrait libre, retrait empêché et retrait de carbonatation, ainsi que les facteurs influents). **Le troisième chapitre** aborde les propriétés de transfert dans les BAP ou dans les MBAPE (absorption capillaire et porosité). Enfin, un état de l'art concernant les sédiments de dragage des barrages et sa valorisation dans le domaine du génie civil en général en tant que matériaux à caractère pouzzolanique en particulier est présenté dans **le quatrième chapitre**. Également du phénomène d'envasement affectant le barrage concerné dans ce travail, en l'occurrence, celui de Chorfa II est décrit dans ce chapitre.

La première partie se termine par une problématique qui définit par la suite l'objectif de cette recherche et le programme expérimental adopté

La deuxième partie est composée de deux chapitres. **Le premier** décrit les matériaux utilisés et les formulations du MBAPE et des pâtes de liant étudiées au cours de nos travaux, nous avons déterminé six formulations qui couvrent deux différents rapports E/L (0.39 et 0.47) et trois types de mortiers. Pour le même rapport E/L, les mortiers ont été formulés à partir des mêmes constituants, avec le même volume de pâte et le même volume total.

Dans **le deuxième chapitre**, sont présentées les méthodes d'essai qui nous ont permis de mesurer toutes les grandeurs physico-mécaniques : (résistance à la compression et à la flexion, retrait plastique, retrait libre (total, endogène et en dessiccation), essai de l'anneau avec la fissuration. Des analyses microstructurales sur des pâtes de liant (DRX-ATG-DTG et MEB-EDS) et de propriétés de transfert (porosité accessible à l'eau et l'absorption capillaire) ont été menées et à partir desquelles nous avons analysé l'effet du type d'addition minérale dans les MBAPE.

La troisième partie présente les résultats et les analyses de la campagne expérimentale menée sur les douze formulations de notre programme (six pâtes et six mortiers). Cette partie comporte quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'étude de l'effet du type d'addition minérale sur l'état frais des MBAPE (l'étalement, le temps de prise) et sur la microstructure des pâtes de liant (teneur en eau liée et libre, analyses DRX, analyses ATG-DTG et observations MEB-EDS).

Le deuxième chapitre présente les résultats des propriétés mécaniques des mortiers à l'état durci (évolutions des résistances en compression, des résistances en flexion).

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'effet du type d'addition minérale sur les propriétés de transfert des mortiers étudiés. Il décrit les résultats issus de l'étude des différentes propriétés de transfert telles que l'absorption capillaire (la sorptivité) et la porosité accessible à l'eau. Les résultats des déformations différés libres et empêchés (retrait plastique, retrait total, retrait dans les conditions endogènes, retrait de dessiccation et son évolution en fonction de la perte de masse des échantillons de mortier et la fissuration due au retrait empêché) sont présentés dans **le quatrième chapitre**.

Enfin, une conclusion générale sur nos travaux ainsi que d'éventuelles perspectives clôturent cette thèse.

**PARTIE I. SYNTHÈSE
BIBLIOGRAPHIQUE**

CHAPITRE I.

LES MORTIERS DE BÉTON AUTOPLAÇANT ÉQUIVALENT

CHAPITRE I. LES MORTIERS DE BÉTON AUTOPLAÇANT

ÉQUIVALENT (MBAPE)

I.1. INTRODUCTION

Le mortier de béton autoplaçant équivalent (MBAPE) se caractérise par une grande fluidité et une grande capacité de remplissage tout en étant stable et garantissant aussi de bonnes performances mécaniques et de durabilité. De telles caractéristiques sont directement liées à sa composition. En effet, les recherches menées, au cours des dernières années, montrent que les MBAPE sont formulés différemment des mortiers ordinaires : ils contiennent plus d'éléments fins qui doivent comporter au moins une addition minérale et un dosage élevé en superplastifiant. En effet, les exigences d'environnement, l'impact sur les coûts, sont également des facteurs qui encouragent à chercher de nouveaux types de fines en remplacement partiel au ciment. Par ailleurs l'Algérie perd un volume de stockage d'eau annuel de 32 millions de m³ sur un volume de 5.2 milliards de m³ des 114 barrages en exploitation [1] dont une quinzaine de ces barrages sont gravement menacés par le phénomène d'envasement [2]. En conséquence les sédiments de dragage ou de curage représentent un réel danger pour la qualité des eaux et d'une manière générale l'environnement. Ils peuvent être des puits potentiels de contamination [3]. Donc, la valorisation des sédiments de dragage dans les matériaux cimentaires et spécialement le mortier autoplaçant est devenue un enjeu économique et environnemental majeur dans le monde [4]. En effet, les sédiments de dragage des barrages n'étaient pas encore exploités sérieusement dans la formulation des matériaux cimentaires. Ces sédiments se présentent comme une alternative intéressante d'un point de vue technique, économique et écologique pour la formulation des mortiers autoplaçants.

Dans ce premier chapitre, une description générale issue de notre recherche bibliographique des principales notions sur les MBAPE est présentée. Nous allons donner un aperçu sur la méthode MBE de sélection des adjuvants. Aussi le calcul de la composition du MBAPE sera expliqué. Nous allons également donner une présentation générale des différents composants qui constituent un mortier autoplaçant (ciment, sable, adjuvants et additions minérales), notamment leurs propriétés physico-chimiques et microstructurales. Enfin, une synthèse sur les différents travaux de recherche qui ont été menés sur l'état frais, les résistances

mécaniques et le retrait des bétons autoplaçants ou des mortiers à base de sédiment de dragage ou des cendres volantes est élaborée, plus particulièrement en ce qui concerne la valorisation des sédiments traités par calcination pour la confection des BAP ou des MBE, où nous allons exposer les principaux résultats obtenus.

I.2. MÉTHODE MBE DE SÉLECTION DES ADJUVANTS

La méthode MBE est arrivée dans le contexte suivant. Les adjuvants s'étant banalisés dans les formulations de béton et la technologie du béton exigeant toujours plus d'ouvrabilité, plus de résistances, le champ d'investigation pour l'optimisation d'une formulation nécessitait un nombre d'essais sur béton trop important qui prenait à la fois trop de temps et consommait trop de matériaux [5].

Par ailleurs, les travaux du projet national Calibe. Maîtrise de la qualité des bétons 1996-2001. Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, sur les « incompatibilités ciment/adjuvant » avaient comme objectif la compréhension des raidissements accidentels des bétons adjuvantés ; alors que le ciment et l'adjuvant pris indépendamment sont conformes aux normes en vigueur et ont donné satisfaction sur d'autres ouvrages [5].

De plus, un rapport du laboratoire régional des ponts et Chaussées (LRPC) de Clermont - Ferrand [6], dont les objectifs étaient d'appréhender la fluidification des bétons, à partir d'un ensemble de fluidifiants, quelques ciments et types des granulats montraient que le maintien de la rhéologie des bétons était fonction :

- Du ciment et de l'adjuvant utilisés ;
- De la nature des éléments fins du sable ;
- De la teneur en eau du béton ;
- De la température.

Il fallait donc trouver une méthode générale qui prenne en compte tous les paramètres qui influencent la rhéologie, qui fasse l'objet d'un consensus général et qui soit :

- Fiable, qui présente une bonne corrélation entre les phénomènes mesurés et ceux mesurés sur béton ;
- Simple, qui puisse être utilisée par tous les laboratoires avec du matériel standard (affaissement et/ou étalement à l'aide d'un cône) ;

- Rapide, à l'aide d'un matériau le plus proche possible d'un béton et qui ne nécessite pas de manipulation contraignante, permettant ainsi de réaliser un grand nombre d'essais dans un minimum de temps [5].

La méthode de mortier de béton équivalent mise au point par Schwartzentruber et Catherine [7] a été choisie et fait référence dans tous les laboratoires.

Cette méthode consiste à déterminer une formule de mortier (appelée MBE) à partir d'une formule de béton dont les propriétés rhéologiques sont corrélables. Le but de cette méthode est de permettre de réduire le nombre de gâchées de béton. Ainsi, à l'aide de cette méthode, il est envisageable d'étudier un grand nombre de possibilités différentes d'adjuvantation et d'optimiser plus efficacement la mise au point de la meilleure synergie entre les matériaux qui composent le béton [5].

I.2.1. Rappel des hypothèses de base de la méthode MBE

La composition du mortier de béton équivalent est déduite d'une formulation de béton de la manière suivante :

- Mêmes nature et dosage en ciment ;
- Mêmes nature et dosage en additions minérales ;
- Le rapport eau efficace/ciment est conservé ;
- Même nature et dosage en adjuvant et même mode d'introduction (dans l'eau d'ajout ou en fin de malaxage, ou une partie dans l'eau d'ajout et une partie en fin de malaxage) ;
- Utilisation du sable du béton ;
- Ajout d'une quantité de sable reproduisant la même surface granulaire que les gravillons retirés [5].

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 [7].

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 [8] (figure I.1).

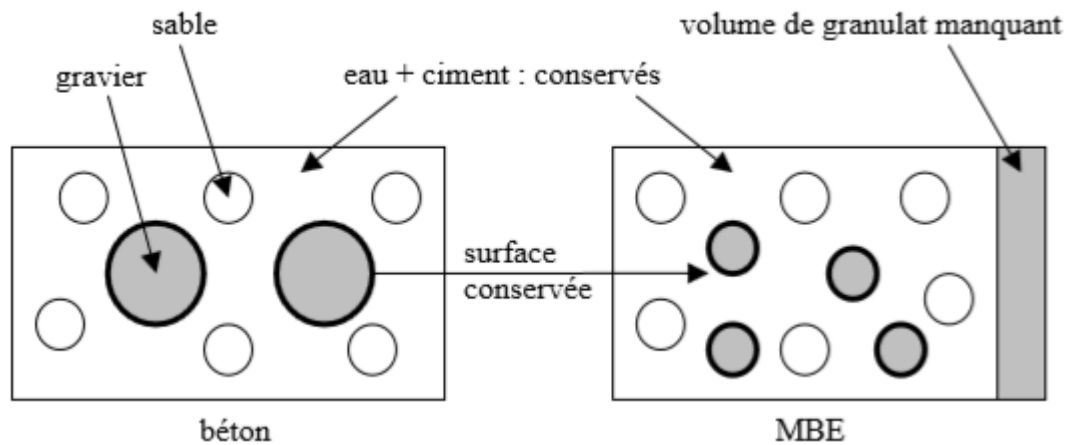


Figure I.1. Passage du béton au MBE [8]

Cette méthode a été validée, dans un premier temps, sur des bétons de consistance plastique à fluide, puis dernièrement sur béton autoplaçant [9]. Elle a été testée :

- À différentes températures (10, 20 et 30 °C) ; sur une trentaine de formulations différentes (C25 à C40) ;
- Sur une vingtaine d'adjuvants (plastifiants et superplastifiants),
- Sur différents types de ciment.

I.2.2. Corrélation MBE / béton

Comme le montre la figure I.2 une corrélation linéaire peut être établie pour toute formule de béton entre l'affaissement mesuré au cône d'Abrams et l'étalement mesuré au minicône (figure I.3). Elle permet ainsi d'obtenir une corrélation entre l'ouvrabilité d'un béton et celle d'un mortier déterminé à partir de ce premier.

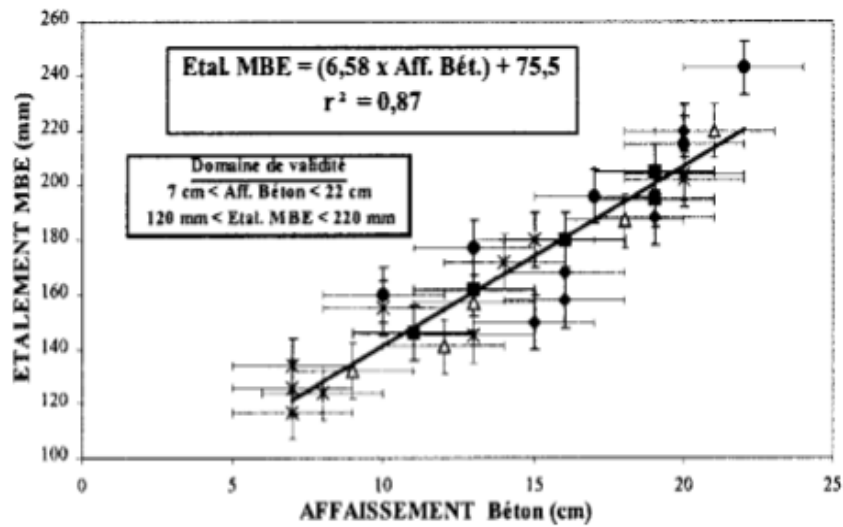


Figure I.2. Corrélation étalement MBE / affaissement béton [7]

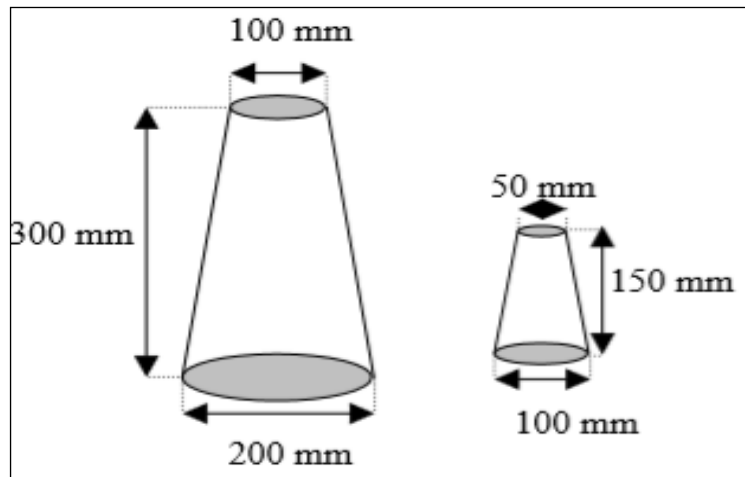


Figure I.3. Cône d'Abrams et mini-cône [8]

Une étude de Haifi en 2011 [10], 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.4 montre une corrélation satisfaisante entre l'étalement BAP et l'étalement MBE [10].

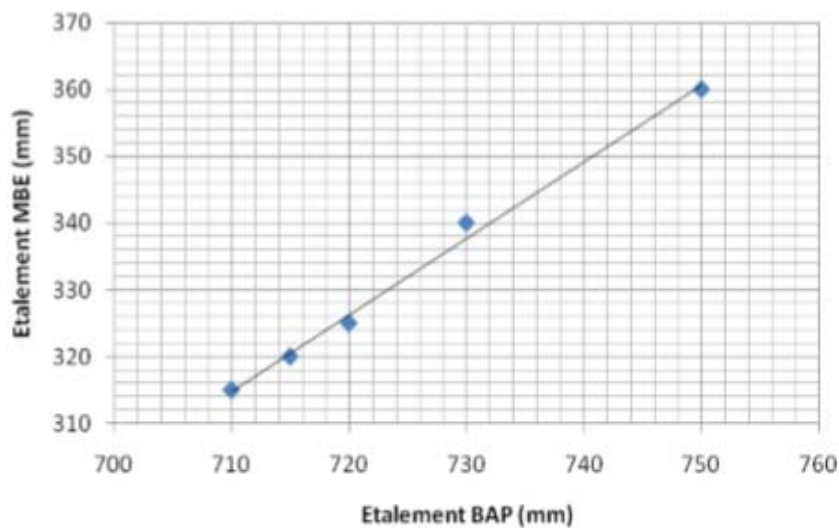


Figure I.4.Étalement du MBE en fonction de l'étalement du BAP [10]

Haifi [10] 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.

Par ailleurs certains auteurs n'ont pas trouvé une corrélation entre les essais d'écoulement (étalement, l'entonnoir et la boîte en L) des BAP et leurs MBE comme le montre les figures (I.5, I.6, I.7). 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.

Par conséquent, les essais seuls d'ouvrabilité sur MBE ne sont pas suffisants pour prévoir toujours le comportement du béton [11].

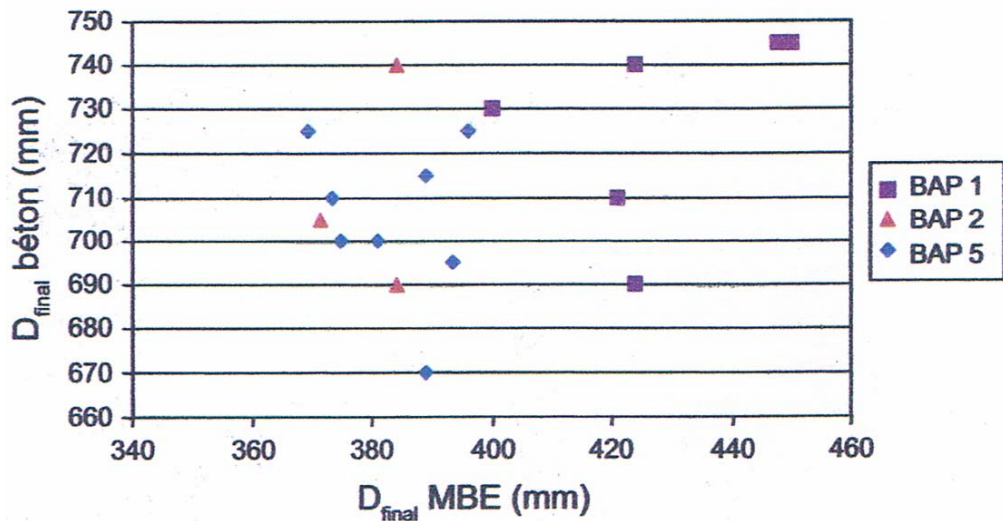


Figure I.5. Relation entre les diamètres finaux d'étalement - Béton / MBE [11].

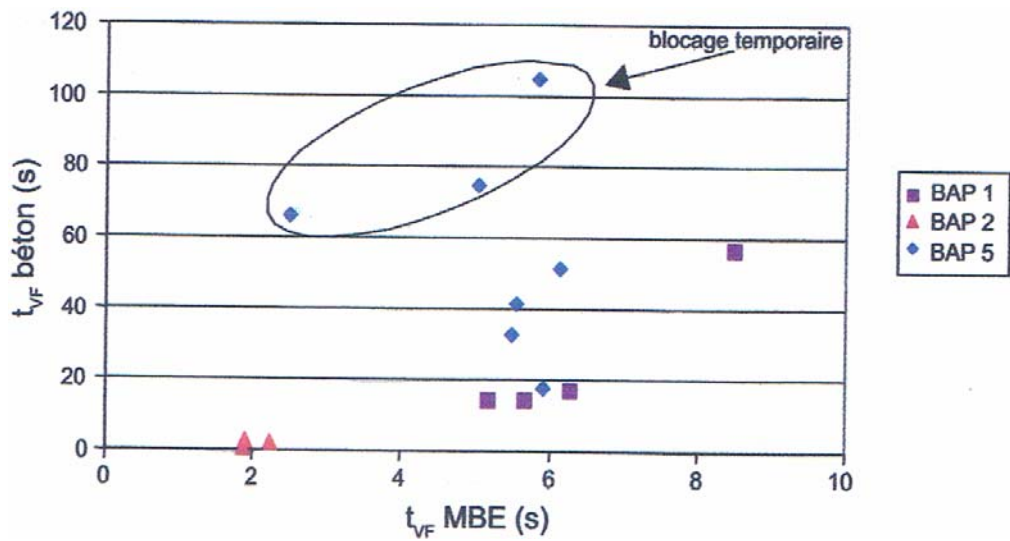


Figure I.6. Relations entre les temps d'écoulement à l'entonnoir des bétons et de leurs MBE respectifs [11].

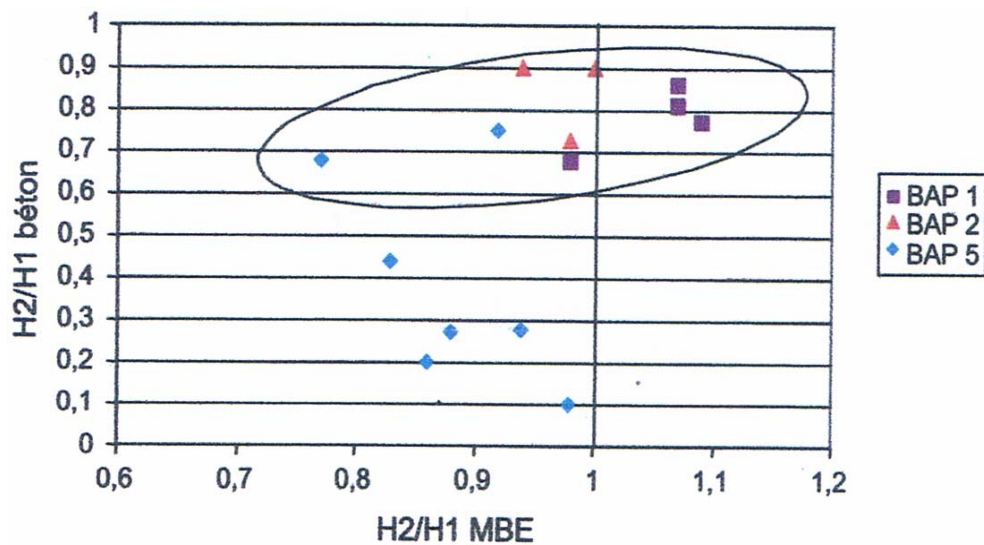


Figure I.7. Correspondance entre les ratios H2/H1 aux échelles béton et MBE [11]

I.2.3. 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 [10] :

- 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 granulats 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.2.4. Calcul des surfaces développées par les granulats

1. Cas des gravillons de masses volumiques voisines

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) :

Tableau I.1. Exemple de gravillons du béton [10]

Gravillon	Dosage dans le béton	Masse volumique	Refus au tamis ti
G3	g3	μ_3	Ri3
G4	g4	μ_4	Ri4

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 :

$$ri = (g3 \cdot ri3 + g4 \cdot ri4) / (g3 + g4) \quad \text{I.1}$$

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

$$ug = (g3 \cdot u3 + g4 \cdot u4) / (g3 + g4) \quad \text{I.2}$$

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 :

$$M_i = (R_{mi} - R_{Mi}) \times (g_3 + g_4) / 100 \quad \text{I.3}$$

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 :

$$d_i = (T_{Mi} + T_{mi}) / 2 \quad \text{I.4}$$

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 5 :

$$v_i = (\pi \cdot D_i^3) / 6 \quad \text{I.5}$$

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

$$S_i = \pi \cdot d_i^2 \quad \text{I.6}$$

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.

$$\omega = 1 / u_g \quad \text{I.7}$$

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.

$$N_i = V_i / v_i \quad \text{I.8}$$

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 :

$$S_i = N_i \cdot s_i \quad \text{I.9}$$

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 :

$$SD = \sum S_i \quad \text{I.10}$$

2. Cas des gravillons de masses volumiques différentes

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.

3. Cas des sables du béton

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 [10].

I.2.5. Calcul de la composition du mortier de béton équivalent

La correction granulaire du mortier MBE est généralement réalisée à partir des sables du béton, il convient donc d'adopter la démarche suivante [10] :

1/ calculer les surfaces développées (S_{dsi}) par chaque sable (S_i) du béton comme indiqué précédemment ;

2/ déterminer les taux de correction par chaque sable selon la méthode décrite ci -dessous.

Si la composition du béton de départ est caractérisée par les éléments suivants (tableau I.2) :

Tableau I.2 Composition du béton et caractéristique physiques [10]

Constituants	Composition kg/dm ³	Masse volumique kg/dm ³	Absorption d'eau %	Extrait sec %
Ciment C	C	μ_c	/	/
Sable S1	S1	μ_1	Abs1	/
Sable S2	S2	μ_2	Abs2	/
Gravillon G3	g3	μ_3	Abg3	/
Gravillon G4	g4	μ_4	Abg4	/
Eau efficace	Eeff	1	/	/
Adjuvant A1	a1	μ_{a1}	/	Xta1
Adjuvant A2	a2	μ_{a2}	/	Xta2

La composition du mortier de béton équivalent (tableau I.3) sera définie comme suit :

Tableau I.3. Composition du MBE corrigé par les sables du béton [10]

Constituants	Composition kg/dm ³	Masse volumique kg/dm ³	Absorption d'eau %	Extrait sec %
Ciment C	C	μ_c	/	/
Sable S1	s'1	μ_1	Abs1	/
Sable S2	s'2	μ_2	Abs2	/
Adjuvant A1	a1	μ_{a1}	/	Xta1
Adjuvant A2	a2	μ_{a2}	/	Xta2

Où les quantités s'1 et s'2 sont calculées de façon à assurer le postulat d'équivalence entre les surfaces développées respectivement par les sables S1 et S2 du MBE d'une part et par tous les granulats du béton (S1, S2, G3, G4) d'autre part.

La composition du MBE, suivant le type de correction, est donnée dans le tableau I.4.

Tableau I.4. Composition du MBE suivant le type de correction [10]

Constituants Possibles mortier	Composition de la phase mortier du béton	Composition du MBE		
		Corrigé par les sables	Corrigé par les sables du béton	Non corrigé
Ciment C	C	C	C	C
Sable S1	s1	s1	s'1	s1
Sable S2	s2	s1	s'2	s2
Sable correcteur Sc	/	Sc	/	/

I.2.6. Utilisation de la méthode MBE

La méthode MBE est souvent utilisée dans le cadre :

- **D'optimisation de formulation** en étudiant l'influence de l'adjuvantation, celle de la température et la robustesse d'une formulation. Elle permet ainsi d'anticiper les problématiques de chantier ;
- **D'assistance technique** face à des raidissements de bétons et maintiens d'ouvrabilité insuffisants. Elle permet ainsi de fournir une réponse rapide et pertinente directement exploitable et transposable [5].

Étudier l'influence de l'adjuvantation consiste à évaluer l'efficacité de différents adjuvants d'une même famille (plastifiant, superplastifiant) en comparant leur dosage et leur sensibilité à une variation de dosage, ainsi que le maintien d'ouvrabilité dans le temps, comme le montre la figure I.8.

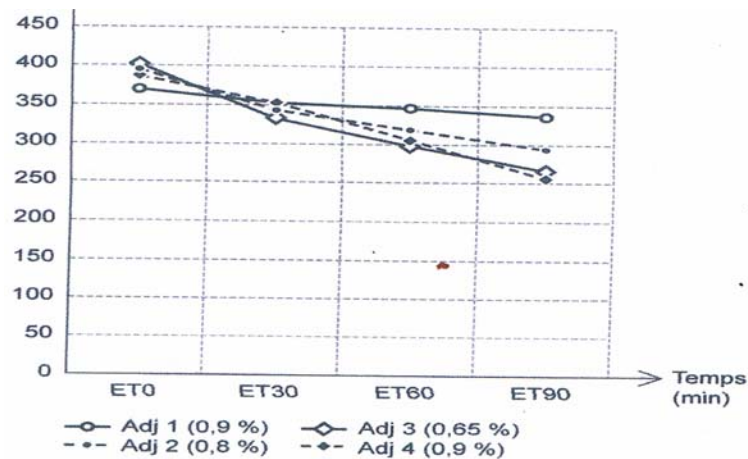


Figure I.8. Comparaison de l'efficacité de plusieurs adjuvants dont le dosage est optimisé sur le maintien de rhéologie du MBE [5]

L'influence de l'adjuvantation peut être aussi évaluée selon le mode d'introduction de l'adjuvant dans le malaxeur : dans l'eau ou en différé.

La méthode MBE peut aussi être utilisée pour évaluer l'influence de la température sur le comportement rhéologique du béton. Il est possible d'anticiper, à partir d'une droite de corrélation établie à 20 °C, le comportement théologique du béton produit à des températures de 10 °C et de 30 °C par des mesures MBE avec une précision de l'ordre de ± 3 cm.

De même, des formules dérivées peuvent être évaluées en sensibilité de formulation à partir de variations de ciment de ± 5 kg/m³ et de variations d'eau de ± 5 l/m³.

La méthode peut être aussi utilisée pour suivre la qualité :

- ❖ D'une formule de béton mise en place sur un chantier et pour laquelle les variations des matériaux pourraient être très préjudiciables ;
- ❖ De la production d'un ciment.

Enfin, certains se servent de la méthode MBE pour construire une banque de données ciments/adjuvants afin de promouvoir par des conseils techniques leurs produits et pour anticiper les couples ciments/adjuvants à proposer et ceux à proscrire [5].

I.2.7. Limites de l'utilisation de la méthode MBE

La première limite de l'utilisation de la méthode MBE est due aux hypothèses de base du calcul de la méthode à savoir :

- ❖ Les particules constituant les granulats sont des sphères parfaites ; en effet, l'utilisation de granulats roulés a tendance à disparaître. Il est donc nécessaire de

mettre en place un facteur correctif de la surface qui prend en compte la forme du granulat afin de ne pas surévaluer ou sous-évaluer la quantité de sable à introduire dans la formulation du MBE ;

- ❖ 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 ; cette hypothèse devient fautive, dans le cas de natures minéralogiques des granulats différentes et de teneurs en fines de gravillons élevées. En effet, lorsque la nature minéralogique du sable et des gravillons est différente et que ces derniers contiennent une quantité importante d'éléments fins inférieurs à 5 mm et tout particulièrement des fines, des éléments fins de gravillons sont remplacés par une quantité de sable présentant la même surface granulaire ; or, les éléments fins calcaires n'ont pas du tout la même réactivité chimique qu'un sable siliceux. Certes, il est possible de tamiser les éléments inférieurs à 5 mm du granulat et de les incorporer dans le MBE, mais la méthode devient plus compliquée et chronophage.

La deuxième limite de l'utilisation de la méthode MBE vient du principe même de la méthode, à savoir qu'une droite de corrélation n'existe que pour un seul béton et son MBE correspondant. Donc, toute reformulation de béton en cas de changement de nature de ciment, de sable, de gravillon et de famille d'adjuvant n'est pas possible à l'aide de la méthode MBE.

La troisième limite d'utilisation de la méthode MBE est l'impossibilité de chercher à interpréter des comportements possibles sur bétons à partir de ceux observés sur MBE, comme la ségrégation, le ressuage, la stabilité au tamis et un blocage lors de l'écoulement du béton.

La quatrième limite d'utilisation de la méthode MBE est l'impossibilité de rechercher une corrélation dans le cas des bétons spéciaux comme ceux réalisés avec de l'air entraîné ou ceux retardés.

La dernière limite d'utilisation de la méthode MBE est le cas de l'utilisation de polymères hydrolysables. Ces derniers, en fonction des ciments, peuvent présenter des reprises de fluidité sur mortier qui ne se retrouvent pas sur béton. L'interprétation des courbes de MBE devient difficile et parfois conduit à supprimer l'utilisation d'un adjuvant à tort, comme par exemple sur la figure 7.8 suivant l'adjuvant n° 6 qui présente la plus forte reprise de fluidité sur MBE, mais ne présente aucune reprise sur béton [5].

I.3. CARACTÉRISATION DU MBAPE À L'ÉTAT FRAIS

I.3.1. Essais de l'étalement au mini cône

La caractérisation à l'état frais du MBAPE s'impose afin de pouvoir valider sa formulation ou l'ajuster si besoin.

L'outil adopté pour cette étape est le mini-cône selon la procédure recommandée par le comité EFNARC (fédération européenne des produits chimiques de construction et des systèmes pour béton spécialisés) [12]. Il sert essentiellement à la détermination des diamètres d'étalement sur une plaque horizontale en fonction des paramètres de composition (figure I.9)

La mesure de l'étalement est effectuée selon deux diamètres orthogonaux, la valeur de l'étalement est la moyenne de ces valeurs arrondie au centimètre près.

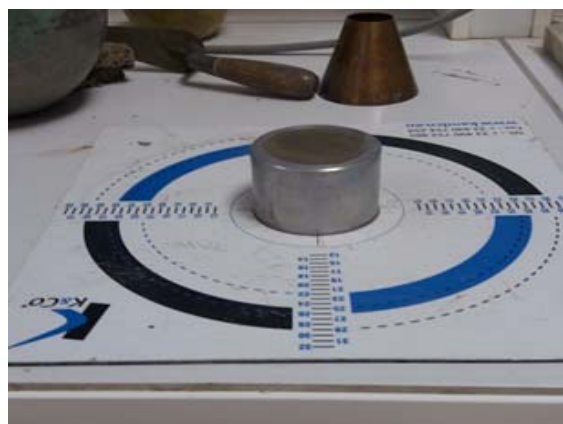


Figure I.9. Photo de la plaque pour mesure d'étalement au cône MBE

I.4. PRINCIPAUX CONSTITUANTS DES MBAPE

I.4.1. Le ciment

Tous les types de ciments peuvent être utilisés dans la fabrication des MBAPE, mais doivent avoir une interaction satisfaisante et une bonne compatibilité avec les adjuvants chimiques et les superplastifiants utilisés. En effet, l'augmentation du dosage en ciment dans le béton ou le mortier, conduit à une augmentation de la chaleur d'hydratation et les déformations différées à long terme (retrait et fluage) également. Il est à noter que les effets engendrés par l'ajout excessif de ciment peuvent entraîner l'apparition des fissures dans les structures. Puisque les MBAPE contiennent plus de fines que les mortiers normaux, une partie du ciment est souvent remplacée par des additions minérales en vue de limiter les effets défavorables (chaleur d'hydratation et retrait) tout en assurant une résistance et une durabilité suffisantes.

Le ciment Portland reste le ciment le plus utilisé dans les BAP ou les MBAPE. Ce ciment répond aux exigences de la norme européenne EN 197-1. Cette norme définit la composition,

les spécifications chimiques, mécaniques et physiques ainsi que les critères de conformité des ciments courants.

- **Propriétés des ciments courants**

Les propriétés générales des ciments courants sont essentiellement liées aux réactions d'hydratation qui se produisent dès le contact avec l'eau et peuvent se poursuivre pendant plusieurs années. Ces propriétés sont d'une part celles correspondant à l'état plastique du mélange ciment + eau et d'autre part celles liées à l'état durci. Il s'agit dans le premier cas des propriétés d'écoulement (rhéologie) nécessaires pour la mise en œuvre et dans le second des propriétés mécaniques comme le durcissement, l'acquisition des résistances mécaniques ou encore le retrait. Ces propriétés sont évolutives dans le temps car elles suivent les réactions d'hydratation et de la structuration progressive de la matrice poreuse [5].

- **Retrait**

Le retrait est une contraction de la pâte de ciment (diminution de volume). Généralement, cette contraction ne s'effectue pas librement, on parle alors de « contraction empêchée », qui génère une contrainte de traction pouvant participer à la fissuration. Un retrait excessif est toujours présent lorsqu'il y a fissuration, mais il existe également beaucoup d'ouvrage sans fissuration [5]. Sur la base de la mesure normalisée, tous les ciments ne présentent pas les mêmes valeurs de retrait. Celles-ci sont fonction des caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques du clinker et du ciment, c'est-à-dire de la composition minéralogique du clinker, de la teneur en alcalins et de la finesse de mouture pour les ciments de type CEM I. Pour les autres types de ciment il faut y ajouter le rôle joué par les constituants principaux autres que le clinker, à savoir le calcaire, le laitier de haut fourneau, les cendres volantes, pour ne citer que les plus courants [5].

Au cours d'une étude systématique en laboratoire à partir de clinkers industriels de composition variable en C_3S et broyés sur une très large gamme de finesse, Venuat [13] a montré que le retrait à 28 jours du ciment est d'autant plus élevé que la finesse de mouture est grande, et ce d'autant plus que la teneur en C_3S est forte (figure I.10). Sur ce diagramme, on constate que la teneur en C_3S est un paramètre de second ordre comparativement à la finesse de mouture [5].

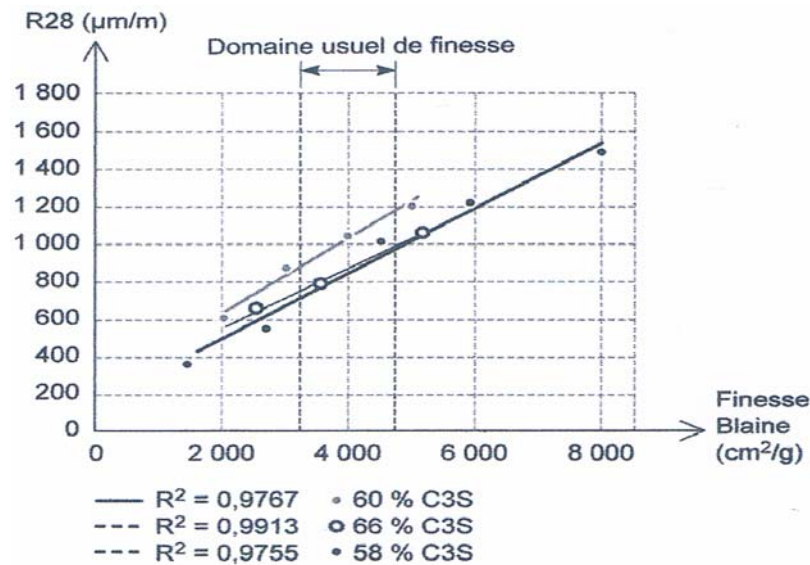


Figure I.10. Retrait à 28 jours en fonction de la finesse de mouture (cm^2/g) et de la teneur en C_3S du clinker [5]

De manière similaire, mais à partir d'une base de données industrielle sur une période couvrant les années 1986 à 2012, on montre que pour des ciments de type CEM I 52,5 N et 52,5 R, le retrait à 28 jours est d'autant plus fort que la teneur en C_3A du clinker est forte et que la finesse de mouture est élevée, confirmant la tendance relevée par Venuat [13] (figure I.11).

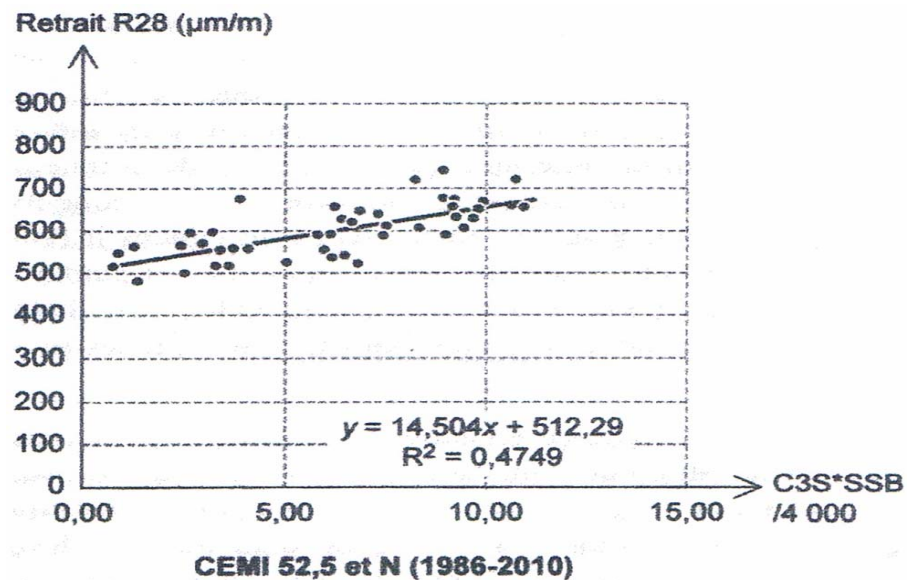


Figure I.11. Proportionnalité du retrait à 28 jours avec la teneur en C_3A du clinker et la finesse de mouture du ciment [13]

On notera sur la figure I.11 que, pour ces ciments industriels, donc dans la gamme usuelle des finesses de mouture, la gamme de variation du retrait à 28 jours s'échelonne entre 450 et 750 micromètres par mètre ($\mu\text{m}/\text{m}$).

Enfin, concernant l'influence des constituants principaux, le calcaire et les cendres volantes ont tendance à minimiser le retrait, alors que l'utilisation de laitier de haut fourneau vitrifié présente une nette tendance à l'augmenter (figure I.12).

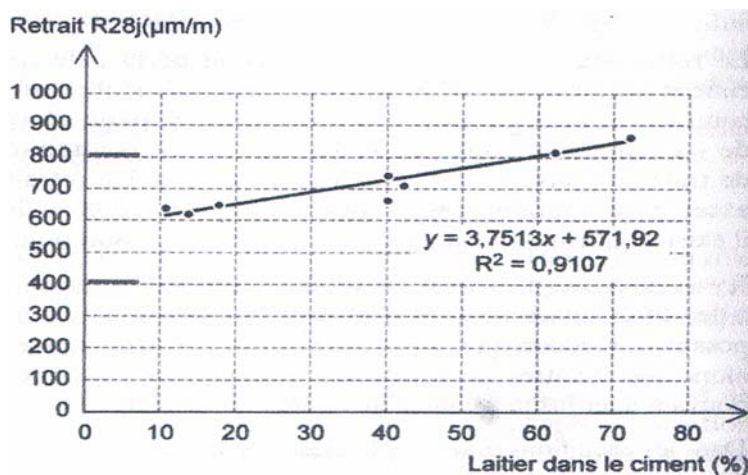


Figure I.12. Evolution du retrait à 28 jours en fonction du contenu en laitier [5]

I.4.2. Le sable

Selon la norme NF EN 12620+A1 de juin 2008, le sable, destiné à la confection de béton, mortier et enduit, est un ensemble des granulats grains minéraux dont la dimension maximale n'excédant pas à 4 mm. Le sable peut résulter de l'altération naturelle de roches massives ou meubles et/ou de leur concassage ou du traitement des granulats artificiels

On distingue trois différents types de sables dans la formulation de MBAPE :

- **Sable alluvionnaire** : le sable alluvionnaire, dit aussi roulé, dont la forme a été acquise par l'érosion. Il est issu de roches meubles des dépôts des alluvions trouvés dans les lits des fleuves ou des rivières. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, le sable utilisé pour le béton est le plus souvent siliceux. Ce sable, plus recommandé à la confection des bétons, doit présenter une granularité telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains

fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Cette granularité est caractérisée par le module de finesse (MF). Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin [14].

- ✓ $1.8 \leq MF \leq 2.2$; le sable convient bien pour obtenir une bonne ouvrabilité et une résistance satisfaisante.
- ✓ $2.2 \leq MF \leq 2.8$; le sable convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités
- ✓ $2.8 \leq MF \leq 3.2$; le sable convient bien pour obtenir une moins bonne ouvrabilité et une résistance élevée avec des risques de ségrégations.
- **Sable de carrière** : le sable de carrière, dit aussi concassé, est un sous-produit des processus industriels contrôlés de concassage, de lavage et de criblage appliqués à des roches massives généralement calcaires. Ce sable, qui se trouve couramment dans la classe granulaire 0/3 mm, est rarement utilisé dans la confection des bétons en raison de leurs taux élevés en fines qui varient de 8 à 30 % et provoquant ainsi un problème de stockage au niveau des carrières. Plusieurs recherches ont été menées pour la valorisation de sable de carrière dans la confection des mortiers et bétons. En effet, elles ont trouvé que la morphologie de ces grains angulaires est plus adaptée à un meilleur accrochage à la pâte de ciment que celle de sable roulé, ce qui offre plus de résistances au béton. L'utilisation de sable de carrière est déterminée par sa granulométrie et ses caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques. En générale, il s'utilise pour des sous-fondations et fondations, des applications liées au ciment, par exemple du béton, et pour la production de mélanges bitumineux [14].
- **Sable de dune** : le sable de dune est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie etc. Le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, forme la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir [14].

I.4.3. Les adjuvants

La qualité finale du béton ou mortier dépend essentiellement des paramètres de composition et de mise en œuvre. Grâce à une gamme étendue d'adjuvants, il est possible pour les

différents acteurs de la profession de proposer des concepts de béton et de bétonnage permettant de répondre à toutes les attentes en termes de spécificités de conception et de mise en œuvre dans les ouvrages.

Les superplastifiants, aussi appelés adjuvants hauts réducteurs d'eau, sont des produits synthétiques, organiques et solubles dans l'eau qui réduisent considérablement la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance donnée dans du béton frais. Cet effet peut être mis à profit de deux façons :

- ❖ **Pour réduire la quantité d'eau**, afin d'augmenter des résistances mécaniques, de réduire la perméabilité et d'améliorer la durabilité ;
- ❖ **Pour disperser les particules de ciment** à volume d'eau égal afin d'augmenter la consistance et la maniabilité [5].

Avec un dosage légèrement plus fort de cet adjuvant, ces deux effets peuvent être obtenus en même temps.

Les superplastifiants/hauts réducteurs d'eau se présentent en quatre groupes principaux utilisés dans le béton ou mortier :

- ❖ **Le formaldéhyde naphthalène sulfaté/sulfoné ;**
- ❖ **Le formaldéhyde mélamine sulfaté/sulfoné ;**
- ❖ **Les copolymères vinyliques ;**
- ❖ **Les éthers polycarboxyliques [5].**

Ces produits peuvent être mélangés en usine ensemble ou avec des « plastifiants normaux » pour donner des superplastifiants à propriétés bien ciblées. Leur dosage moyen est de 0,8 à 3 % du poids du ciment.

Les mécanismes d'actions des superplastifiants font l'objet de nombreuses études depuis plusieurs années. Aujourd'hui, il en résulte une meilleure compréhension des interactions entre les superplastifiants et le ciment. Il est communément validé que la cinétique d'adsorption des superplastifiants à la surface des particules de ciment est à la base de la défloculation et de la dispersion des grains de ciment dans le temps. En effet, leur adsorption influence les caractéristiques physiques et chimiques des grains de ciment [5].

Parallèlement, l'effet de l'adjuvant augmente avec le dosage. Cependant, à partir d'un certain dosage fonction du polymère utilisé, il y a un phénomène de saturation au regard de son efficacité défloculante et fluidifiante. Autrement dit, à partir de ce dosage à saturation, il n'y a plus de polymère qui s'adsorbe à la surface des grains de ciment ; il commence à rester dans

la solution interstitielle. Il n'y a donc plus d'effet sur la consistance et un effet secondaire retardateur commence à apparaître [5].

Afin de mesurer cette saturation, des mesures de temps d'écoulement au cône de Marsh à différents dosages en superplastifiants sont réalisées. Les courbes obtenues (figures I.13 et I.14) présentent une cassure nette à partir d'un certain dosage. Cette cassure est appelée « point de saturation » [15].

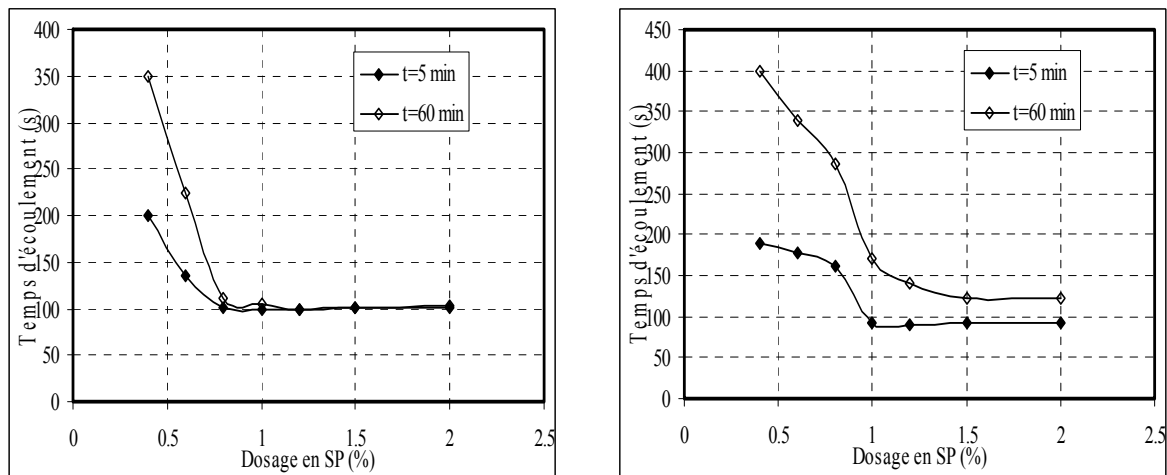


Figure I.13. Courbe de détermination du point de saturation pour différentes combinaisons ciment-superplastifiants pour un coulis de rapport E/C=0.35 [16]

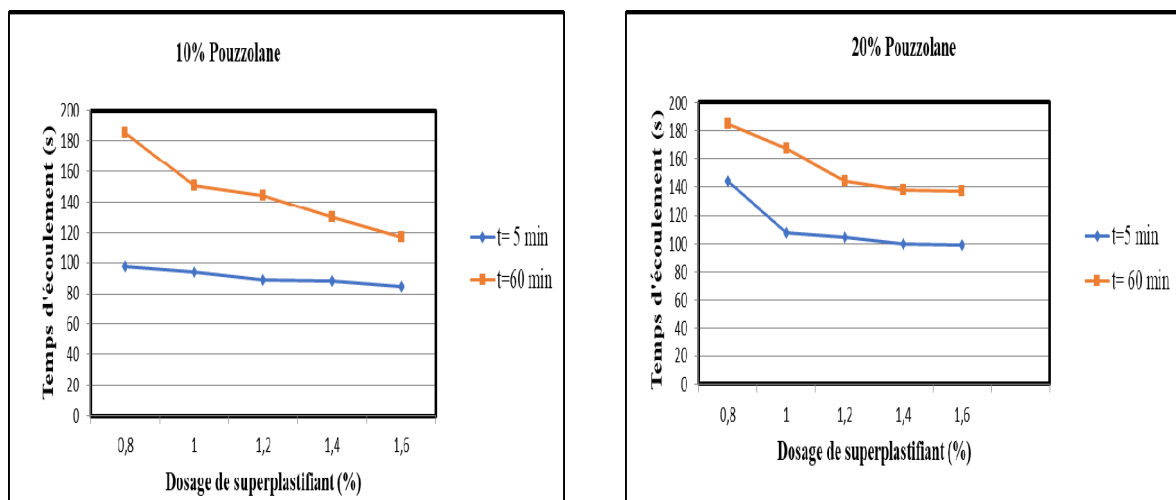


Figure I.14. Courbe de détermination du point de saturation pour différentes combinaisons ciment-pouzzolane naturelle -superplastifiants pour un coulis de rapport E/C=0.35 [17]

La fluidité des MBAPE est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la

sensibilité du mortier à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

I.4.4. Les additions minérales

Les additions minérales possèdent souvent une finesse comparable à celle du ciment, voire une finesse beaucoup plus grande.

Du fait que la plupart des additions minérales sont des sous-produits industriels, leurs utilisations dans la fabrication des matériaux cimentaires peuvent réduire le coût du traitement des déchets industriels et limiter ainsi leurs impacts environnementaux. Les additions minérales sont aussi connues par leur influence sur les propriétés du béton ou du mortier à l'état frais et à l'état durci [18]. Certaines additions minérales améliorent considérablement la fluidité. Toutefois, l'influence des additions minérales sur l'écoulement des BAP et leurs MBAPE à l'état frais dépend principalement du dosage, du type et de la finesse de l'addition minérale utilisée [19, 20]. Les effets des additions sur la réduction de la chaleur d'hydratation ont été exploitée dans des situations pratiques [21, 22]. Le matériau le plus utilisé généralement est la poudre de calcaire appelée filler calcaire, considéré comme un ajout économiquement fiable [23-25]. Dans ce qui suit, nous nous focaliseront sur les additions suivantes : les sédiments de dragage et les cendres volantes.

I. 4.4.1. Les sédiments de dragage (Vase)

Les sédiments sont principalement constitués de sable fin, de limon et d'argile [26]. Ainsi, leur utilisation dans les bétons et les mortiers a fait l'objet de plusieurs recherches, dans le but essentiel de ne plus les considérer comme déchet, mais plutôt comme matière premières [27].

On peut distinguer 3 grands types de sédiments [28] :

- ❖ **Les galets et les gravillons** qui proviennent de l'embouchure des fleuves torrentiels ou de l'érosion des falaises.
- ❖ **Le sable** dont la taille du grain varie de quelques dizaines de micromètres à 2 millimètres, produit ultime de l'érosion des roches cristallines par les fleuves et les glaciers disparus.
- ❖ **Les limons et les vases** dont la taille du grain est inférieure 60 micromètres.

La vase calcinée résulte de la calcination d'une argile, la kaolinite, à une température de 750°C pendant 5 heures [29]. La calcination entraîne une réaction de déshydroxylation du matériau, avec une destruction de la structure cristalline initiale conduisant à une nature amorphe du matériau, qui lui confère un pouvoir pouzzolanique élevé.

- **Composition chimique et minéralogique**

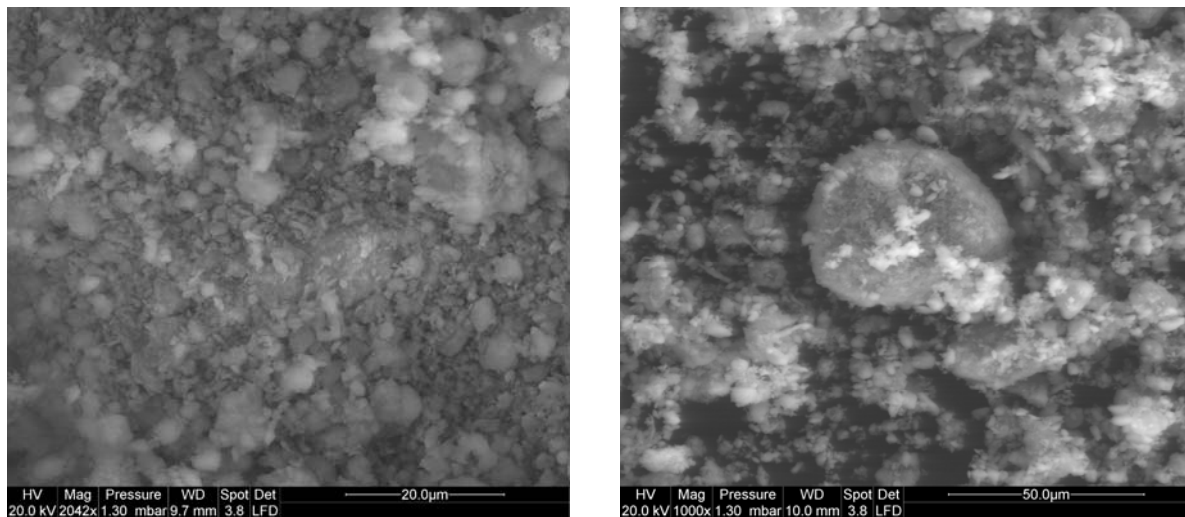
Comme le montre le tableau I.5 dont les valeurs sont tirées de 6 compositions [30-35] de sédiments traités par calcination à 750°C pendant 5 heures de différents laboratoires algériens, les sédiments traités sont essentiellement formés d'oxydes d'aluminium, de silicium (> 80%) et de la chaux. Les autres éléments sont les plus souvent des oxydes de fer, de titane, de potassium, de sodium, de calcium et de magnésium. La perte au feu peut atteindre 2%. La vase peut présenter une teinte jaunâtre après calcination.

Tableau I.5. Composition chimique de la vase calcinée (% massique)

Oxydes	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PF
Teneur (% massique)	47-70	13-18	15-16	2-3	6-8	0.3-0.4	2 -3	0.1-0.3	1-2

- **Morphologie et finesse**

La morphologie de la vase par l'observation au microscope électronique à balayage (MEB) (figure I.15) est des grains très fins, poreux et leurs surfaces sont rugueuses. Des particules de formes irrégulières, qui sont associées au tamisage de la vase brute. Le quartz, présentant des particules anguleuses.



a)

b)

Figure I.15. Morphologie de la vase du barrage de Chorfa II (Algérie) observée au microscope électronique à balayage, (laboratoire La SIE- Université de La Rochelle-France) : a) vase brute, grossissement 2042x b) vase calcinée, grossissement 1000x

La taille des particules de la vase calcinée s'étend de moins d'un micromètre à plusieurs dizaines de micromètres (figure I.16). Leur surface spécifique se situe dans une fourchette de 6000 à 8000 cm²/g (méthode Blaine), plus grande que les ciments. Certains sédiments broyés peuvent par contre présenter des surfaces spécifiques moins importantes.

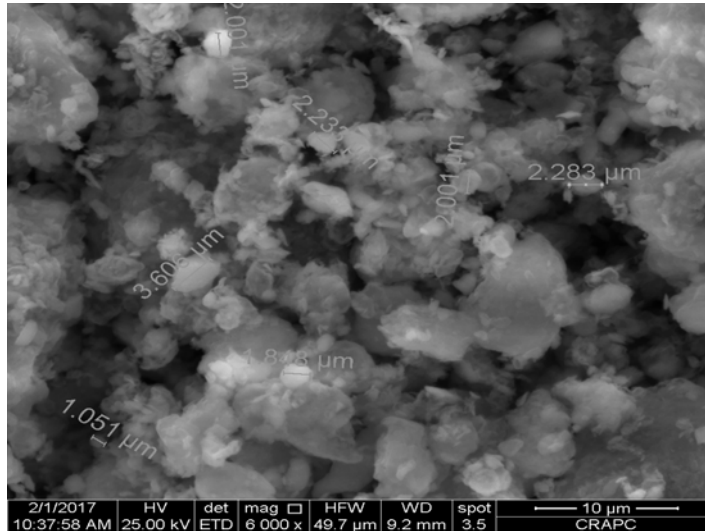


Figure I.16. La taille des particules de la vase calcinée du barrage de Chorfa II (ouest algérien) observée au microscope électronique à balayage, grossissement 6000x (Société CRAPC-Tipaza-Algérie)

- **Réactivité et produits d'hydratation**

La vase calcinée étant principalement composée de silice et alumine amorphes et de la chaux, elle est réactive en présence de chaux, généralement dès les premiers jours de l'hydratation. La phase siliceuse permet de produire des C-S-H pouzzolaniques, caractérisés par des rapports Ca/Si plus faibles que pour les C-S-H issus du C₂S et du C₃S. La phase alumineuse entraîne la formation d'aluminates et de silico-aluminates de calcium hydratés, par insertion d'aluminium dans le réseau des C-S-H, pour former des C-A-S-H et, par précipitation, la formation d'aluminate tétracalcique hydraté (C₄AH₁₃), d'hydrogrenat (C₃AH₆) et de strätlingite (C₂ASH₈). La réactivité de la vase calcinée dépend essentiellement de la finesse du produit, ainsi que du degré de déshydroxylation de la kaolinite.

En conclusion, On peut dire qu'une partie de la chaux libérée du ciment a été consommée par la vase pour donner naissance à un gel de silicate de calcium hydraté type CSH [36,37].

I. 4.4.2. Les cendres volantes

Les cendres volantes utilisées en tant qu'addition minérale pour les bétons (NF EN 450-1) ou comme constituant principal de ciments (NF EN 197-1) font référence à un type de sous-produit particulier, le terme étant réservé aux cendres volantes de centrales thermiques à charbon pulvérisé (CP) pour la production d'électricité [5].

Il existe deux principaux types de cendres volantes CP, selon la composition du charbon brûlé, divisés en fonction de leur teneur en calcium :

- ❖ **Les cendres silico-calciques**, contenant des teneurs supérieures à 10 % d'oxyde de calcium réactif et présentant des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques ;
- ❖ **Les cendres silico-alumineuses**, composées essentiellement de silice et d'alumine, avec moins de 10 % d'oxyde de calcium réactif (et moins de 1 % de CaO libre), présentant uniquement des propriétés pouzzolaniques.

Seules les deuxièmes sont actuellement normalisées en France et en Europe (NF EN 450-1) pour une utilisation dans les bétons, alors que les deux sont utilisables et normalisées pour une intégration dans les ciments : cendres volantes calcique (W) et cendres volantes siliceuses (V). Ces mêmes cendres sont utilisées dans d'autres pays comme les Etats -Unis (ASTM C 618) sous la dénomination **classe C** et **classe F**, respectivement [5].

- **Composition chimique et minéralogique**

Les cendres volantes présentent des compositions très variables car dépendantes de l'origine du charbon brûlé.

Les cendres volantes silico-alumineuses sont formées essentiellement de silice et d'alumine, comme le montre le tableau I.6, qui donne une fourchette de composition typique. Elles comportent également du fer et du calcium, puis du magnésium, du soufre et des alcalins (sodium et potassium) dans des proportions moindres. Des teneurs importantes en silice et alumine garantissent habituellement, en fonction de leur forme minéralogique, la réactivité pouzzolanique des cendres [5].

Tableau I.6. Composition chimique des cendres volantes silico-alumineuses et silico-calciques (% massique) [5]

Oxydes	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Perte au feu
Silico-alumineuses	38-52	2-10	20-40	1-3.5	6-16	1-2	2-5	0.3-2.5	3-20
Silico-calciques	30-50	20-30	15-25	1-7	5-17	1-2		1.5-8	0.3-1

Les cendres volantes présentent une structure mixte, composée d'une phase amorphe, contenant du silicium et de l'aluminium, et plusieurs minéraux cristallisés, les principaux étant, dans le cas des cendres silico-alumineuses, le quartz (SiO₂), la mullite (Al₆Si₂O₁₃), l'hématite (Fe₂O₃), et éventuellement la magnétite (Fe₃O₄). Les cendres silico-calciques peuvent contenir, en plus de ces phases des sulfates de calcium (anhydrite CaSO₄), de la chaux vive (CaO), de la périclase (MgO) et du silicate bicalcique (C₂S) [5].

- **Morphologie et finesse**

La particularité des cendres silico-alumineuses issues de centrales thermiques CP est qu'elles sont majoritairement sphériques, avec un certain nombre de cénoosphères (particules creuses) pouvant contenir de fines particules [5] (figure I. 17).

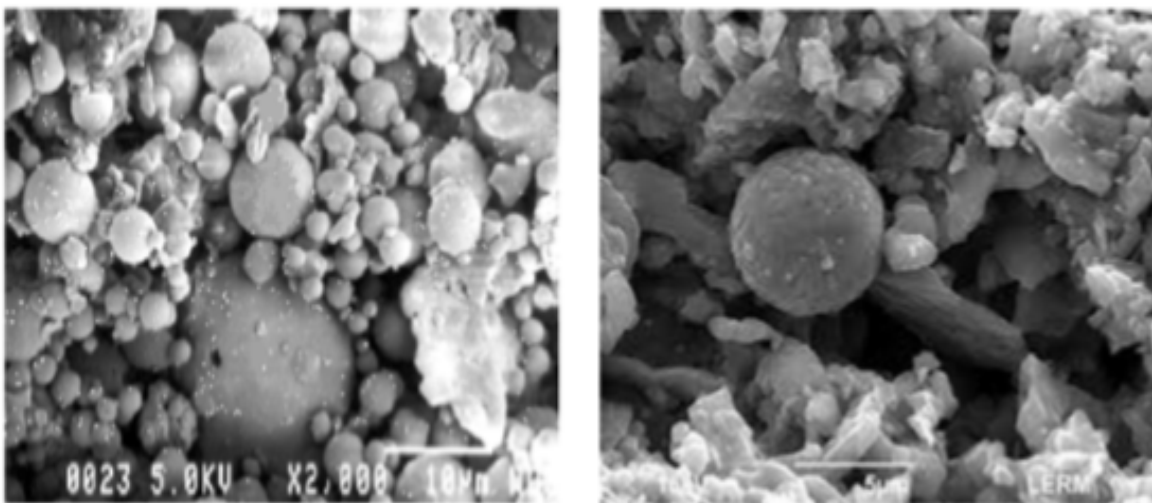


Figure I.17. Morphologie de cendres volantes silico-alumineuses observée au microscope électronique à balayage, grossissement 2000x [38]

La taille des particules des cendres volantes silico-alumineuses s'étend de moins d'un micromètre à plusieurs centaines de micromètres. D'un point de vue normatif, 60 % de la masse de la cendre doit avoir un diamètre inférieur à 45 μm . Leur surface spécifique se situe dans une fourchette de 2500 à 3800 cm^2/g (méthode Blaine), un peu plus faible que la plupart des ciments. Certaines cendres broyées ou sélectionnées peuvent par contre présenter des surfaces spécifiques plus importantes [5].

- **Réactivité et produits d'hydratation**

Seule la phase amorphe des cendres silico-alumineuses est active dans une matrice cimentaire, les phases cristallisées pouvant être considérées comme inertes en milieu basique. Dans le cas des cendres silico-calciques, la chaux, les sulfates et les silicates peuvent réagir et même présenter une certaine hydraulicité [5].

La réactivité pouzzolanique des cendres est proportionnelle à leur teneur en matière amorphe et à sa solubilité. Cette phase est attaquée par les ions hydroxydes présents dans la solution interstitielle et, après dissolution, se combine avec la portlandite pour former des C-S-H à faible rapport Ca/Si. La présence d'aluminium dans la phase amorphe peut modifier la composition des C-S-H, tout en créant également des aluminates et des carbo-aluminates de calcium hydratés (C_4AH_{13} et $\text{C}_4\text{ACH}_{11}$). La formation de strätlingite (C_2ASH_8) a quelquefois également été observée. En fonction de la présence ou non de sulfates, il peut également y avoir production d'ettringite.

La cinétique de réaction des cendres volantes est généralement assez lente, beaucoup plus que pour les autres additions pouzzolaniques (fumée de silice, métakaolin). Il n'est pas rare de voir les effets significatifs après 28, voire 90 jours. La réaction peut se poursuivre pendant très longtemps, tant qu'il reste de la portlandite dans la matrice [5].

I.5. ÉTUDES DE L'INFLUENCE DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LES PROPRIÉTÉS DES MORTIERS ET DES BAP

Dans la fabrication du béton ou du mortier, le ciment est l'élément le plus coûteux, réduire sa teneur par l'utilisation d'additions minérales est une solution certes économique mais également environnementale.

Plusieurs recherches ont été menées afin d'avoir l'influence des taux de substitution en vase calcinée et en cendres volantes sur les comportements des coulis, des pâtes, des mortiers de béton équivalent et des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci.

I.5.1. Études de l'influence des additions minérales sur les propriétés des mortiers et des BAP à l'état frais

Pour une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les MBAPE contiennent une quantité de fines supérieure à celle des mortiers conventionnels. Ces fines proviennent du ciment, des additions et des sables. 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 MBAPE de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Différentes additions sont citées dans la littérature, les plus courantes sont les fillers calcaires, les cendres volantes, la fumée de silice, pouzzolane naturelle et le laitier de haut fourneau qui sont utilisées en général pour diminuer le coût du matériau cimentaire en remplacement d'une partie du ciment, ou pour améliorer la continuité du squelette granulaire et ainsi réduire les problèmes de ressuage et/ou ségrégation [39]. Nous nous limiterons sur les additions suivantes : les sédiments de dragage et les cendres volantes

I.5.1.1. Influence des sédiments de dragage (vase)

Plusieurs recherches ont montré que l'utilisation des sédiments traités dans les pâtes, les mortiers et les BAP augmente le dosage de superplastifiant utile en termes rhéologiques pour obtenir une dispersion similaire à celle d'un matériau cimentaire sans ajouts.

Semcha et al [27] ont confectionné à l'aide de la méthode des « plans d'expériences », des pâtes homogènes, fluides capables de s'écouler sous leur propre poids. Quatre facteurs ont été utilisés la confection de ces pâtes, le ciment, la pouzzolane artificielle (vase calcinée), le super plastifiant et l'eau. Ces pâtes autoplaçantes ont montré un comportement rhéologique viscoplastique.

En 2015, Belaribi [40] a étudié l'influence de la vase calcinée sur des mortiers normaux. D'après les résultats du tableau I.7, il a remarqué que le pourcentage de plastifiant augmente avec l'augmentation des dosages en vase.

Tableau I.7. Dosages du plastifiant des mortiers à base de vase calcinée de Chorfa et Fergoug
[40]

Pourcentage de l'ajout en vases	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Ciment (g)	450	439.8	429.9	420.6	411.6	402.9	394.7
Sp /C (%)	0	0.10	0.25	0.46	0.67	0.92	1.27
Sp (g)	0	0.44	1.07	1.93	2.76	3.71	5.01

D'après ces résultats, la maniabilité des mortiers pouzzolaniques diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la vase calcinée. Pour garder une maniabilité plus ou moins constante, il a fallu augmenter la quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'un mélange maniable et ouvrable. Cela prouve que l'augmentation du taux de la vase accroît sensiblement la demande en eau. La croissance de la demande en eau est principalement attribuée à l'augmentation progressive de la surface spécifique des liants pouzzolaniques.

La recherche de Belguesmia en 2018 [41], montre que la consistance normale d'une pâte de ciment et une pâte de vase calcinée en utilisant l'appareil de Vicat. Les résultats des essais expérimentaux ont montré que la pâte de 100% de vase est en consistance normale avec un rapport E/V de 0.45 alors que la pâte de 100 % de ciment est en consistance normale pour un E/C égal à 0.26. Dans cette étude, il a conclu 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 de ces 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 il a testé deux types 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. D'après les résultats de l'écoulement au cône de Marsh et l'étalement au mini-cône, il a conclu que l'adjuvant « Viscocrete Tempo 12 » offre plus d'efficacité pour compenser la perte de maniabilité due à l'utilisation de la vase.

Pour continuer ses recherches, il a tenté d'élaborer une formule d'un mortier de béton équivalent (MBE) à partir d'une formulation de BAP dite de référence élaborée par Bouhamou [42].

Ce MBE servira par la suite comme une base des propriétés d'ouvrabilité des BAP de son étude. Des essais d'identification ont été effectués afin de pouvoir gérer le passage du BAP au MBE. Il a 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. D'après plusieurs essais, une corrélation entre le MBE et le BAP de référence a été correctement établie, ce qui montre que le MBE formulé est considéré comme représentatif du BAP de référence.

En revanche, si on s'intéresse aux bétons ordinaires ou aux bétons autoplaçants à base de vase calcinée, différents résultats ont été publiés [31, 43, 44, 45, 46] pour l'état frais (affaissement ou étalement, boîte en L, stabilité au tamis, ressuage, V-Funnel et J-ring) (figures I.18 et I.19). Les auteurs ont montré que les bétons à base de vase calcinée sont plus visqueux par rapport au béton témoin, car au-delà d'un dosage critique, la viscosité du béton augmente avec la substitution.

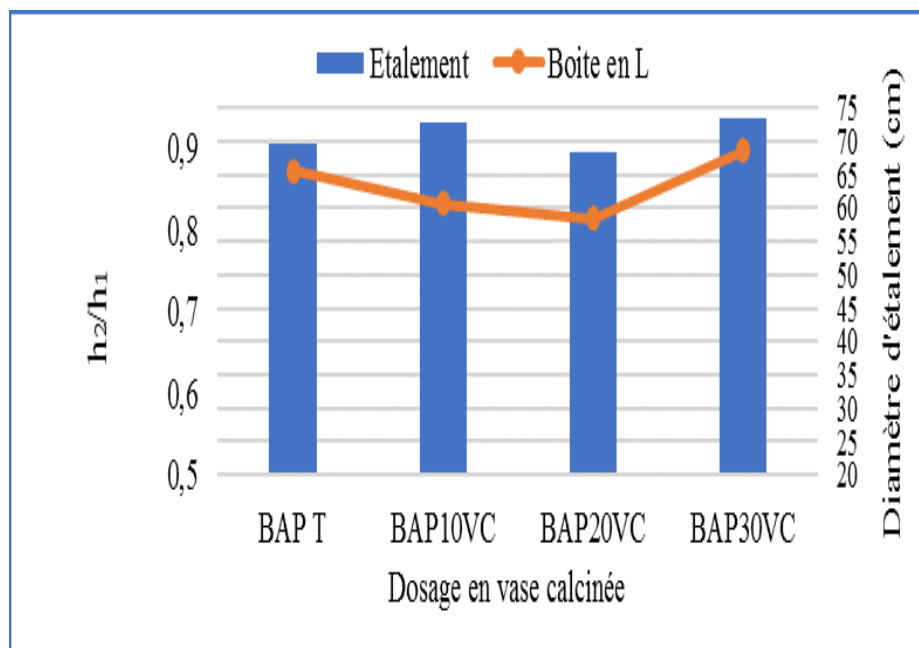


Figure I.18. Etalement et taux de remplissage des BAP [46]

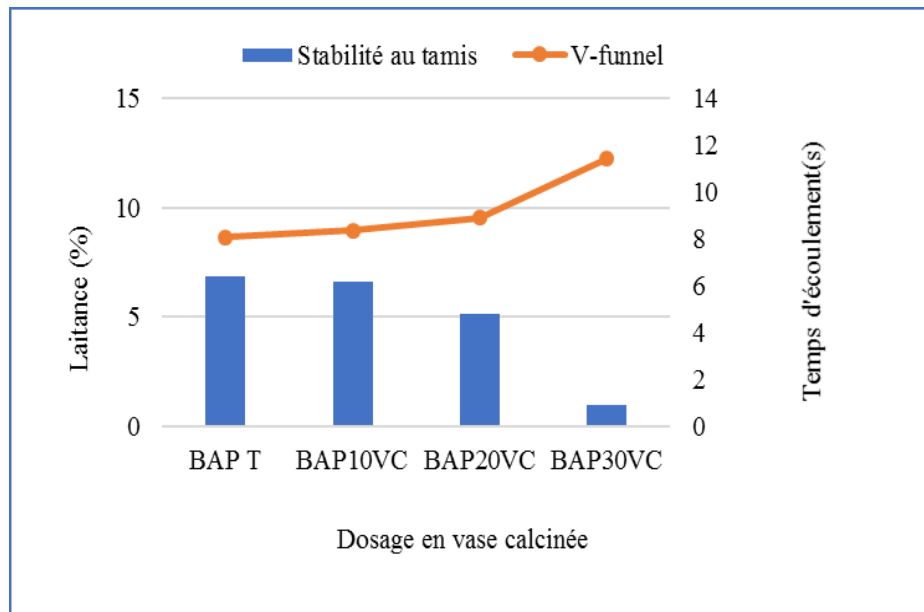


Figure I.19. Taux de ségrégation et temps d'écoulement des BAP [46]

En revanche, ils ont constaté aussi que les bétons à base de vase nécessitent un dosage plus important en superplastifiant qui est directement proportionnel au pourcentage de substitution (figure I.20), 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 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 bétons.

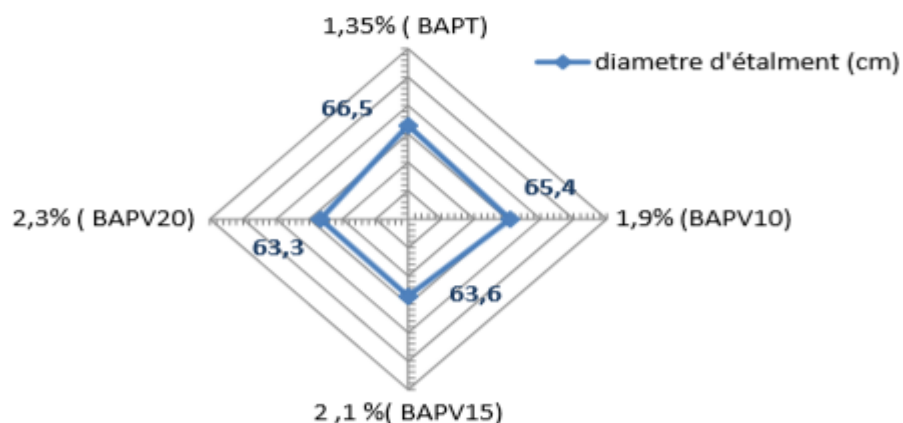


Figure I.20. Diagramme des diamètres d'étalement en fonction du pourcentage du superplastifiant [45]

1.5.1.2. Influence des cendres volantes

Plusieurs recherches ont montré que l'utilisation des cendres volantes dans le BAP améliore les propriétés rhéologiques et réduit ainsi le dosage de superplastifiant utile pour obtenir une dispersion similaire à celle d'un BAP sans ajouts. D'autres études ont montré que l'incorporation des CV, diminue sensiblement la pression latérale sur les coffrages, augmente considérablement les temps de prise [47,48].

Certains auteurs ont montré que la quantité de ciment de remplacement ne devait pas dépasser 30% pour les cendres volantes.

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 [49] a constaté que l'utilisation de cendres volantes réduit ces deux paramètres dans le cas des BAP. Cependant, Park et al [50] 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 également réduire la ségrégation et améliorer la stabilité [51].

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. [52] 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 [52].

I.5.2. Études sur l'influence des additions minérales sur les propriétés mécaniques des mortiers et des BAP

I.5.2.1. Influence des sédiments traités et des cendres volantes sur les résistances mécaniques

Vu l'effet bénéfique des ajouts dans les bétons vis-à-vis des résistances mécaniques, l'utilisation des sédiments traités dans les pâtes, les mortiers ou dans les bétons autoplaçants est susceptible d'améliorer cette propriété.

Kazi Aoual-Benslafa et al [35] ont étudié la résistance à la compression pour cinq séries de mortier confectionnées, qui sont désignées par : MT (mortier témoin : ciment CPA+15% de pouzzolane naturelle) et MSPC5, MSPC10, MSPC15 MSPC20, les mortiers avec respectivement les pourcentages de 5, 10, 15 et 20% de sédiments SPC (Sédiments phosphatés et calcinés) (figure I.21). Ils ont observé que toutes les valeurs de la résistance en compression des mortiers MSPC5, MSPC10, MSPC15 et MSPC20 sont inférieures à celle du mortier MT. Elles sont respectivement plus faibles de 12%, 22%, 30% et 33% à l'échéance de 90 jours. Cette diminution de la résistance est probablement due à l'activité lente de l'addition SPC.

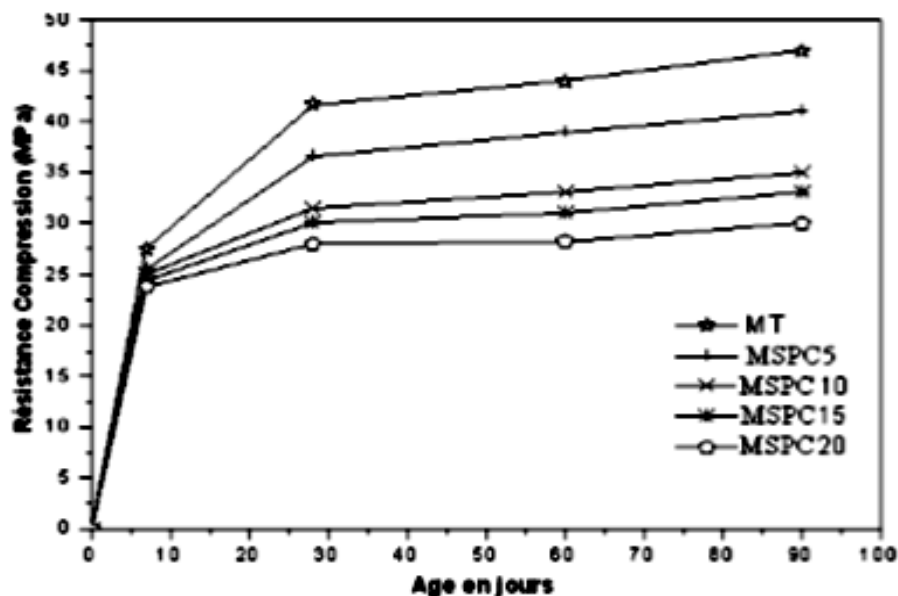


Figure I.21. Résistances en compression des différents mortiers en fonction de l'âge [35]

Benamara et al [53] ont étudié les caractéristiques mécaniques en compression simple sur des éprouvettes de pâte pure, de forme cylindrique de 2 cm de diamètre et 4 cm de hauteur selon le procédé mis au point par le laboratoire des matériaux minéraux de l'institut national des sciences appliquées de Lyon [54]. Ces éprouvettes sont conservées dans une chambre humide pendant 28, 60 et 120 jours à une température de 20°C. A l'âge requis, les éprouvettes sont démoulées 24 heures avant d'être soumises à l'essai de compression simple. Quatre mélanges ont été préparés, les proportions en vase calcinée à 750°C sont 30 %, 50 % et 70 % et un témoin (100 % de ciment).

La quantité d'eau de gâchage est déterminée par essai de consistance normale. Le rapport eau sur solide (E/S) varie en fonction du pourcentage de vase calcinée ajoutée au ciment. La valeur E/S est entre 0,3 pour le ciment seul et 0,45 pour le mélange à 70 % de vase calcinée en passant par 0,35 pour le mélange à 30 % de vase calcinée. D'après la figure I.22, la résistance mécanique à la compression simple augmente en fonction de l'âge de conservation et le pourcentage en ciment. Le mélange à 30 % de vase calcinée constitue un liant honorable puisqu'il donne des résistances en compression simple égales à 85 % de celles obtenues avec le ciment seul. Ces résultats peuvent être améliorés en ayant un temps de conservation plus long, sachant que la réaction pouzzolanique intervient après celle d'hydratation du ciment libérant de la portlandite Ca(OH)_2 . Les performances sur un échéancier plus long sont prometteuses.

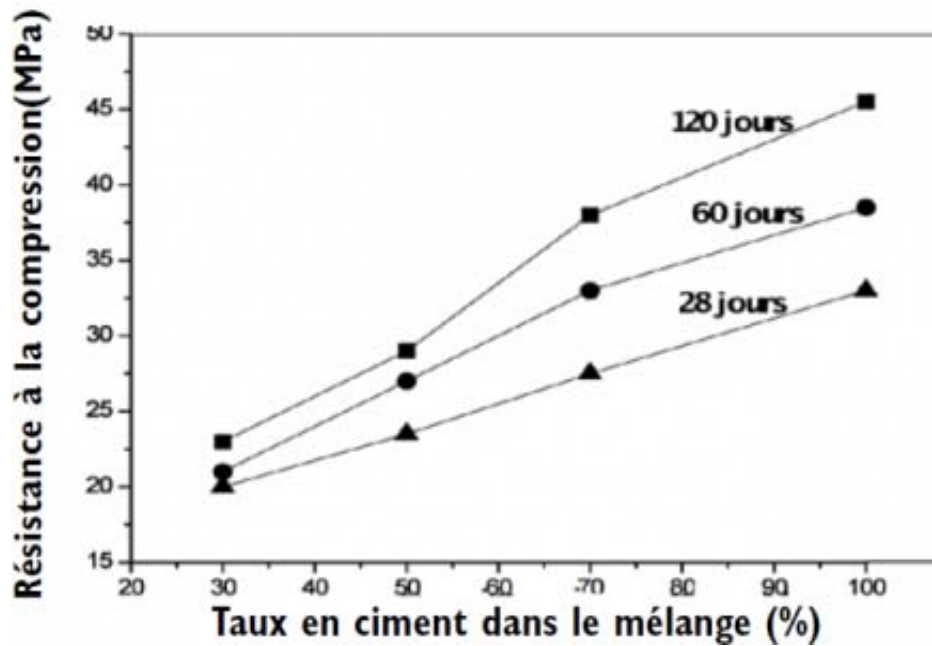


Figure I.22. Courbes des résistances mécaniques à la compression des différences en fonction de l'âge de conservation [53]

Belaribi [40] a étudié l'effet des différents types de vase calcinée (pouzzolane naturelle, vase de Chorfa et vase de Fergoug) avec trois pourcentages (10%, 20% et 30%) sur la résistance à la compression des mortiers. Il a remarqué que les performances mécaniques se développent durant les premiers jours de l'hydratation, plus rapidement pour les mortiers à base de 10 et 20 % des vases que pour le mortier témoin ce qui n'est pas le cas des mortiers à 30 % de vases. Au-delà de 28 jours les résistances des mortiers incorporant les vases dépassent celles des mortiers pouzzolaniques et témoin.

En 2018, Mostefa et al [33] ont étudié l'effet de la vase provenant du barrage de Fergoug dans l'ouest de l'Algérie sur les résistances en compression des mortiers. Des échantillons de géopolymères ont été synthétisés en ajoutant la solution d'hydroxyde d'activation (8 M) à un sédiment calciné : SC3 (750°C/3 h), SC4 (750°C / 3h) et SC5 (750°C / 5h) à un rapport de masse de liant liquide de 0,8. Le mortier a été préparé en suivant les instructions des normes EN 196-1 .1 et coulé dans un moule cubique (PVC) de la taille (4x4x4) cm³. Tous les échantillons ont été scellés dans des sacs en plastique pour empêcher l'évaporation rapide de l'eau pendant le durcissement et chauffés à 60°C pendant 24 heures, après avoir été démoulés et vieillis à la température ambiante. Les mesures de résistance à la compression ont été effectuées à 7 et 28 jours.

Les auteurs ont montré que les échantillons de mortier (SC5) présentent les meilleures performances mécaniques à 7 et 28 jours par rapport aux échantillons de mortier (SC3) et (SC4) (figure I.23). Les auteurs ont expliqué que les performances mécaniques obtenues pour le mortier (SC5) sont dues essentiellement à la réactivité des produits calcinés, de sorte que le temps de calcination de 5 heures est mieux indiqué pour la transformation des phases cristallines aux phases amorphes pour ce type de sédiment.

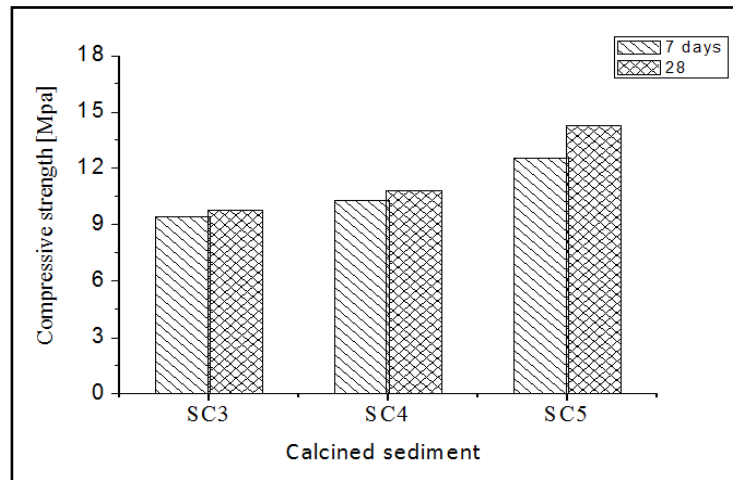


Figure I.23. Effet du temps de calcination sur la résistance à la compression [33]

En 2018, Amar et al [55] ont étudié l'effet des sédiments traités thermiquement à 850 ° C pendant une heure sur les résistances en compression des mortiers. Dans leurs travaux, ils ont formulé des mortiers avec des rapports Eau/Liant= E/L allant de : $E/L=0.4$, $E/L=0.5$, $E/L=0.6$, $E/L=0.7$ et $E/L=0.8$. Pour chaque rapport E/L donné, des mortiers contenant des taux croissant de sédiments en substitution du ciment sont formulés ($p=0\%$, 5% , 8% , 10% , 15% , 20% , 25%). Des tests de compression ont été effectués pour déterminer l'évolution de la résistance en fonction du temps, du rapport E/L et du taux de substitution des sédiments. Les résultats de la figure I.24 indiquent que les mortiers avec un E/L de 0,5 présentait la résistance à la compression la plus élevée comme optimum pour un taux de substitution donné p . La résistance à la compression diminue également lorsque le rapport E/L est augmenté en raison de la teneur élevée en eau qui crée des vides lors du durcissement et une croissance dans le temps, de sept à 60 jours, pour tous les mélanges. De plus, les auteurs ont observé que plus le rapport E/L est élevé, plus la résistance est faible.

Le mortier avec un rapport E / L de 0,5 a atteint une valeur maximale de 65,86 MPa à 60 jours et la résistance la plus basse était pour un rapport E / L de 0,8 (23,00 MPa à 60 jours).

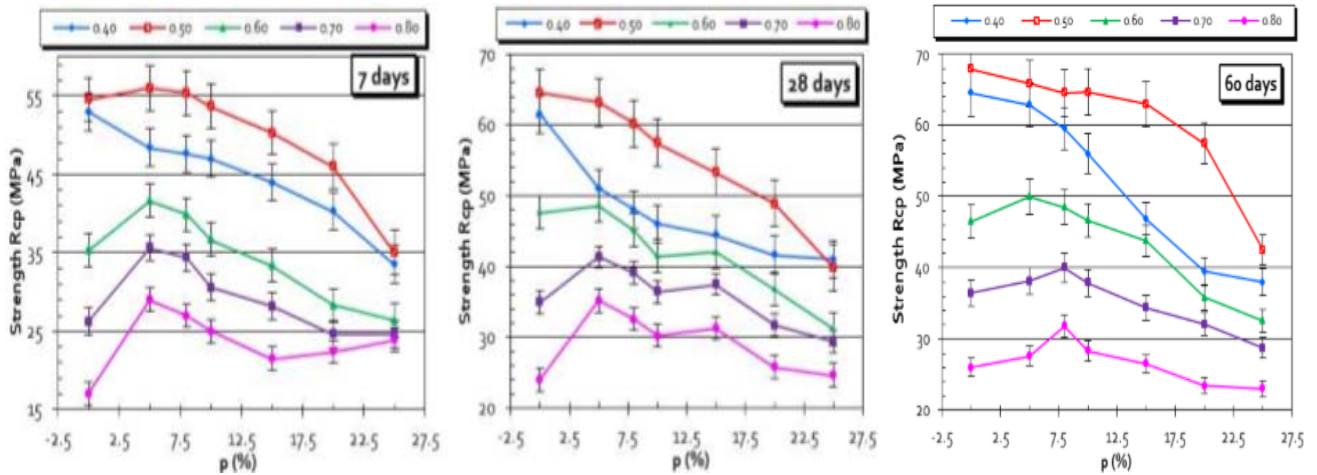


Figure I.24. Relation entre la résistance et le taux de substitution à maturation de sept, 28 et 60 jours [55]

Les auteurs ont montré aussi la relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport E / L pour chaque taux de substitution (figure I.25). Les mortiers à base de sédiment sont désignés par MSPp (avec p = 0 - 5 - 8 - 10 - 15 - 20 - 25). Les résultats indiquent que le RM (mortier témoin) et le MSP5 ont la plus haute résistance à la compression. Les MSP8 et MSP10 présentaient des valeurs de résistance similaires (60,23 MPa et 58,16 MPa, respectivement), ce qui impliquait que les sédiments pourraient contribuer à la résistance à la compression globale en améliorant l'hydratation du ciment [56-60]. Les augmentations de la résistance vont de 4% à 27%, en fonction du rapport E / L et de la concentration de substitution utilisée. Les auteurs ont expliqué cet effet par le rôle des sites préférentiels de nucléation au cours des réactions de ciment fournis par de fines particules de sédiment qui permettent une meilleure répartition des produits hydratés (remplissage de vides) et conduisent ainsi à une structuration plus efficace de la matrice de cimentation.

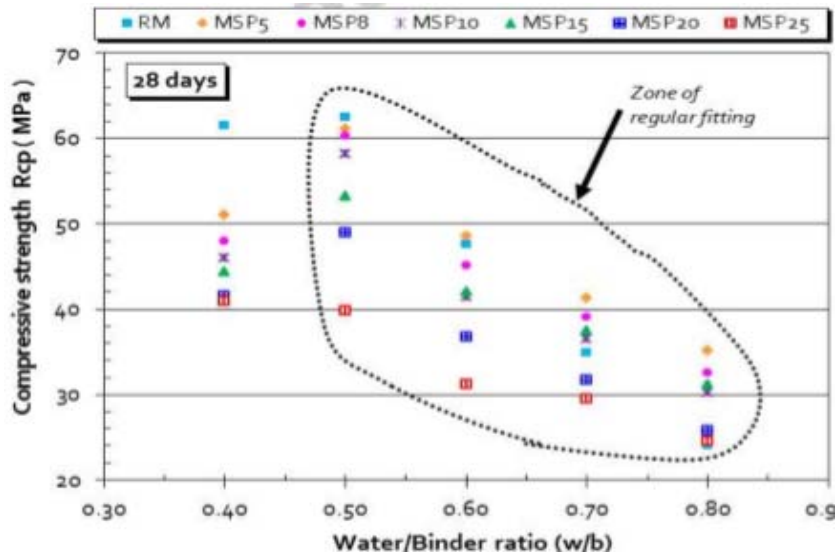


Figure I.25. Relation entre la résistance et le rapport E / L pour chaque taux de substitution à 28 jours [55]

En 2019, Safhi et al [61] ont étudié le recyclage des sédiments de dragage dans des mortiers autoplaçants et de leur impact sur les propriétés durcies des pâtes / mortiers. Les sédiments bruts ont été séchés, tamisés à **120 μm** , puis traités thermiquement à **850 ° C** pendant **une heure**. Quinze mélanges de mortiers / pâtes ont été préparés à partir de différents pourcentages de sédiments traités en remplacement du ciment en utilisant la méthodologie de surface de réponse, basée sur la variation de trois paramètres indépendants : rapports **eau / liant**, **sédiments / ciment** et **volume du liant / volume total**. La teneur en poudre des mélanges variait entre 380 et 600 kg / m³. La quantité de ciment, les sédiments traités, le rapport sédiments traités au ciment (S / C) et le rapport eau sur liant (E / L) ont varié de 300 à 500 kg / m³, 0 à 250 kg / m³, 0 à 0,5, et 0,25 à 0,55 respectivement. Des mélanges de mortier ont été préparés avec les mêmes formulations que les pâtes, avec un sable normalisé supplémentaire de 1350 kg / m³ (NF EN 196-1). Les mortiers ont été coulés dans un moule prismatique de 40 × 40 × 160 mm et stockés dans une pièce à 90% de température moyenne de 20 ± 2 ° C. Après 24h, les éprouvettes ont ensuite été démoulées et placées dans de l'eau à 20 ± 2 ° C. Les propriétés de durcissement des échantillons de mortier ont été déterminées à 7, 28, 60 et 90 jours. Les auteurs ont montré que les propriétés mécaniques (module d'élasticité et résistance à la compression) diminuent avec le taux de sédimentation dans les ciments mélangés. Cependant, cette diminution est acceptable et reste intéressante. Les sédiments traités ont démontré leur efficacité en tant que matériau de

cimentation supplémentaire, ils combinent également un rapport de performance économique et mécanique important.

Les cendres volantes influent positivement sur la résistance à la compression des BAP [62]. Son effet le plus notable est d'augmenter la résistance à long terme par réaction pouzzolanique. Selon Felekoglu et al. [63], l'utilisation de cendres volantes (classes C et F) dans les BAP entraîne une réaction entre la phase vitreuse des cendres et la portlandite (CH) produite par l'hydratation du ciment, ce qui conduit à la formation de gel de CSH, et donc l'augmentation de la résistance en compression, surtout à long terme avec le développement de la réaction pouzzolanique des cendres volantes. Contrairement aux cendres volantes de classe C, celles de classe F réduit le développement de la résistance au jeune âge du béton mais augmente sa durabilité [64]. Felekoglu et al. [63] ont étudié l'effet des différentes additions minérales (filler calcaire de classe F, filler calcaire de classe c, cendre volante de classe F et cendre volante de classe C) sur la résistance à la compression des BAP. Ils ont trouvé que les BAP à base de cendres volantes (classe C et F) montrent des résistances plus élevées que celles des BAP à base de fillers calcaires.

Obla et al. [65] ont étudié des BAP à base de cendres volantes très fines (avec une granulométrie moyenne de 3 micromètres, et 90% des matériaux plus petits que 7 μm). Selon ces auteurs, cette taille plus fine conduit à une réaction accrue et une grande augmentation de la résistance à la compression.

Patel et al. [66], Christensen et Ong [67], Khatib [68] ont remarqué une amélioration significative de la résistance à la compression dans le cas de l'utilisation d'un volume élevé de cendres volantes dans les BAP. L'utilisation des cendres volantes peut réduire sensiblement la demande en ciment dans les BAP. Dinakar et al, [62] sont arrivés à substituer un grand pourcentage de ciment par la cendre volante (Tableau I.8). Cette substitution n'a pas une influence considérable sur la résistance à la compression des BAP à l'âge de 28 jours de conservation. Par ailleurs, on note une amélioration de la résistance à 90 et 180 jours d'âge (bétons de classe de résistance 30, 60, 90 et 100 MPa).

Tableau I.8. Résistance à la compression des BAP (SCC) à base de la cendre volante et des BOV (NC) [62]

No	Classe de béton (MPa)	Nom	Cendre volante (%)	Ciment (kg/m ³)	Rapport E/C	fc28(MPa)	fc90(MPa)	fc180(MPa)
1	20	NC20	0	234	0.79	29.0	35.6	38.85
2		SCC558	85	83	0.41	14.64	22.07	27.74
3	30	NC30	0	319	0.58	43	44.5	45.0
4		SCC557	70	165	0.34	34.9	45.52	57.25
5		SCC757	70	225	0.33	34.83	44.96	55.81
6	60	NC60	0	500	0.37	74	76	76
7		SCC655	50	275	0.34	57.9	66.72	79.50
8		SCC655	50	325	0.34	50.07	60.63	72.05
9	90	NC90	0	552	0.29	78.00	80	84
10		SCC553	30	385	0.31	77.08	91.95	103.25
11		SCC530	30	350	0.36	71.62	75.26	89.53
12	100	NC100	0	659	0.22	87	86	88
13		SCC551	10	495	0.29	86.41	90.75	102.5

1.5.2.2. Influences des sédiments traités et des cendres volantes sur le retrait

Depuis quelques années, plusieurs chercheurs se sont intéressés aux bétons ou aux mortiers à base d'additions. Une grande partie de ces études traitent des effets des additions sur le comportement différé des matériaux cimentaires. L'étude de leur retrait est un sujet qui se développe mais reste limitée. Dans ce qui suit, nous résumons l'état de l'art sur le retrait de ces matériaux avec des sédiments traités et des cendres volantes.

Belas et al. [69] ont étudié le retrait des bétons ordinaires contenant différents pourcentages de la vase de Fergoug en substitution par rapport au dosage en masse du ciment (0%, 10 %, 15 % et 20 %). Les auteurs ont remarqué que le retrait endogène de BV0 et BV10 présente des évolutions très proches, contrairement à celui du BV15 qui présente un pic dans les déformations, alors que le BV20 est caractérisé par un retrait endogène plus faible. Pendant

que le BV10 développe un retrait de dessiccation le plus faible et qui s'approche de celui du BV0 à toutes les échéances.

Bouhamou et al [31] ont étudié l'effet de la vase calcinée sur le retrait libre des bétons autoplaçant. Dans leurs travaux, ils ont remplacé 0%, 10%, 15% et 20% de ciment portland par des sédiments traités par calcination à 750°C pendant 5 heures. Les auteurs ont trouvé que le remplacement de 0%, 10%, 15% et 20% de ciment portland par la vase calcinée entraîne une diminution des amplitudes du retrait total, endogène et de dessiccation par rapport au béton témoin

En 2018, Taieb et al. [17] ont étudié l'effet de la vase calcinée (0%,10%,20% et 30%) sur le retrait libre du béton autoplaçant. Ils ont constaté que la présence de la vase à des taux de 20% et 30% fait diminuer le retrait de dessiccation et total, cela est le résultat de leur contribution à l'amélioration de la microstructure.

Belguesmia [41] a étudié le retrait des BAP en substituant de la vase calcinée dans le ciment Portland avec des taux de 0%, 10%, 20% et 30% en volume. L'auteur a montré que les BAP à base de ciment au vase présentent des retraits totaux très proches, tandis que la présence la vase à des taux convenables fait diminuer le retrait de dessiccation.

Selon Druta [70], le retrait de séchage des BAP à base de cendre volante de classe F est légèrement inférieur à celui à base de cendre volante de classe C.

Khatib[68]obtient une diminution significative du retrait total avec l'utilisation d'un pourcentage élevé de cendres volantes dans les BAP. En effet, à 56 jours d'âge le retrait des BAP est réduit de moitié pour une proportion de cendres volantes de 60% et d'environ 1/3 pour une proportion de 80% par rapport à celui sans cendre volante. Selon Khatib [68], il existe une relation linéaire entre la teneur en cendre et le retrait total

Koehler [64] trouve que la cendre volante dans les BAP réduit la demande en eau et par conséquent le retrait total et le retrait endogène des BAP.

Zhao H et al [71] ont étudié l'effet de cendres volantes vis-à-vis du retrait, les BAP à base de CV ont présenté un retrait de séchage inférieur à celui du BAP de contrôle. Aussi, plus le taux de substitution du ciment par les CV augmente, plus la valeur du retrait diminue par rapport au BAP de contrôle.

I.6. CONCLUSION

Les MBAPE constituent une véritable alternative aux mortiers normaux, comme l'ont montré un certain nombre d'exemples. Parmi les propriétés des MBAPE qui ont été abordées dans ce

chapitre, nous soulignons trois de leurs importantes caractéristiques : le volume de sable, l'emploi de superplastifiants et l'utilisation d'une quantité importante d'addition ($\emptyset < 80 \mu\text{m}$). Nous remarquons aussi l'importance apportée à l'utilisation des sédiments traités dans la confection des mortiers et des BAP. Par ailleurs, il n'y a que peu d'informations sur l'effet de la vase calcinée sur le comportement mécanique, particulièrement sur les déformations différées libres des MBAPE. Or, vu l'important volume de l'ajout minéral, il semble nécessaire de donner une perspective particulière à ce sujet.

Par conséquent, dans notre programme de recherche, nous avons tracé comme objectif l'étude de la nature des additions minérales (vase calcinée et cendres volantes) sur le retrait des MBAPE.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] MEKERTA B., SEMCHA A., RAHMANI F., TROALEN J.P., « Erosion spécifique et caractérisation de la résistance au cisaillement des sédiments du barrage de Fergoug », Xème Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, Sophia Antipolis, 14-16 Octobre 2008.
- [2] HALLOUCHE W., REMINI B., « Le dragage des retenues de barrages : quelques exemples algériens », la houille blanche, n°5, 2004, p. 95-100.
- [3] HAMOUCHE F., ZENTAR R., « Caractérisation des Matières Organiques dans les sédiments de dragage par méthodes thermiques et chimiques en vue d'une valorisation dans le domaine des travaux routiers », 35èmes Rencontres de l'AUGC, Université de Nantes, France, 21 au 24 mai 2017.
- [4] AGOSTINI F., SKOCZYLAS F., LAFHAJ Z., «About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment». Cement and Concrete composites, 2007, 29:270-278.
- [5] SCHWARTZENTRUBER L., et TORRENTI J., «Le grand livre des bétons». Paris, Editions Le moniteur, 2014.
- [6] GEOFFRAY M., «Pré-étude sur la fluidification des bétons», 1997.
- [7] 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.
- [8] **Chapitre II.** «Etude des bétons et des mortiers».
- [9] NACHBAUR L., KAPLAN D., MARCHESE G., «Extension of concrete Equivalent Mortar (CEM) method to Self-Compacting Concrete». 7th CANMET/ACI International conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete, Berlin, Germany, Supplementary Papers, P.333-346,2003.
- [10] HAIFI M.R., « FORMULATION DES BETONS AUTOPLACANTS ». Thèse de Magister, Université de Constantine. Algérie. 2011.
- [11] BERNARDINI, C. «Les bétons autoplaçants, Presses Ponts et Chaussées», Paris. 2011.

- [12] FNARC, «Specification and guidelines for self-compacting concrete». Feb. 2002, pp 29–35. Free pdf copy downloadable from <http://www.efnarc.org>.
- [13] VENUAT M., «Influence du ciment sur le retrait hydraulique après prise». Publication technique du Centre d'étude et de recherches sur les liants hydrauliques (CERILH), n° 189, Mai 1968.
- [14] BOUDANA E., BEN FETTACHA M-A., «Compacité des bétons autoplaçants aux différents types de sables». Projet de fin d'étude. Université Ziane Achour, Djelfa, 2016.
- [15] DE LARRARD F., «Structures granulaires et formulation des bétons». Laboratoire des ponts et Chaussées, 2000.
- [16] HALLAL A., « Effets combinés des ajouts minéraux et des superplastifiants sur la compatibilité des coulis, mortiers et bétons », Thèse de Doctorat, USTOMB, 2011.
- [17] TAIEB F., BELAS N., BELARIBI O., BELGUESMIA K., BOUHAMOU N., MEBROUKI A., «Effet couplé des fines et de l'adjuvant sur la fluidité du coulis de ciment», 6^{ème} Colloque de la Recherche Appliquée et de Transfert de Technologie (CRATT2017) 14-16 Avril 2017.
- [18] JIE S., «Comportement mécanique des matériaux et des structures précontraintes en bétons autoplaçants (BAP)». Thèse de doctorat de l'Université de Reims champagne-ardenne-France, (2009).
- [19] NEHDI M., MINDESS S., AITCIN P.C., «Rheology of high-performance concrete: Effect of ultrafine». Cement and Concrete Research, 28(5), pp 687-697, (1998).
- [20] YAHIA A., TANIMURA M., SHIMOYAMA Y., «Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio». Cement and concrete Research, 35(3), pp 532-539, (2005).
- [21] KHAYAT K.H., BICKLEY J., LESSARD M., «Performance of self-consolidating concrete for casting basement and foundation walls». ACI Materials Journal, 97, 374–380, (2000).
- [22] HENDERSON N.A., «Self-compacting concrete at Millennium Point» Concrete, April, 26–27, (2000).
- [23] PETERSSON O., and BILLBERG P., «A model for self-compacting concrete, in Proc.Of the Mt. RILEM conf on production methods and workability of concrete». Paisley, E&FN Spon, London, pp 483-492, 1996.
- [24] DOMONE P.L., «Chai, H.-W. Testing of binders for high performance concrete». Cement and Concrete Research, 27, 1141–1147. (1997).

- [25] SEDRAN T., and DELARRARD F., «Mix design of self-compacting concrete». Proceedings of the International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete, Paisley. Eds. P.J.M.
- [26] NIK NEZHAD D., «Contribution à l'étude du comportement mécanique, du retrait et des propriétés de transport des bétons autoplaçants avec additions minérales, approche numérique et expérimentale». Thèse de Doctorat, Insa de Rennes, France ,2015.
- [27] SEMCHA A., MEKERTA B., MAAROUF H., ABBOU H., «Utilisation des propriétés pouzzolaniques des sédiments de barrage pour leur valorisation», 12SM, Montréal, 2016
- [28] BENASLA M., «Caractérisation de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda et valorisation en tant que matériau de construction». Doctorat LMD, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF.
- [29] SEMCHA A., «Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug». Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2006.
- [30] TAIEB F., BELAS N., BELARIBI O., BELGUESMIA K., and HADJ SADOK R., «Influence of calcined mud on the mechanical properties and shrinkage of self-compacting concrete». 2nd International Congress on Materials and Structural Stability (CMSS-2017). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814901026>.
- [31] BOUHAMOU N., MOSTEFA F., MEBROUKI A., BELARIBI N., MESBAH A.H., Etude du comportement d'un béton autoplaçant à base de vase de dragage vis-à-vis du retrait, Colloque 01 Eco matériaux. 24-28 Novembre, (2014).
- [32] SAFER O., BELAS N., BELARIBI O., BELGUESMIA K., MEBROUKI A., HAMADACHE M., "Study of the behavior in the fresh and hardened state of an eco-concrete based on dredged sediments", Journal of Materials and Environmental Sciences, JMES, 2017 Volume 8, Issue 6, Page 2026-2033.
- [33] MOSTEFA F., BOUHAMOU, MESBAH H.A., AGGOUNE S., MEKHATRIA D., "Sedimentary Clays as Geopolymer Precursor", International Journal of Engineering Research in Africa, Vol. 39, pp 97-doi:10.4028/www.scientific.net/JERA.39.97, 2018.

- [34] BELGUESMIA K., BELAS BELARIBI N., AMIRI O., LEKLOU N., BELARIBI O., «Influence of treated sediment substitution percentage on workability, strength and porosity of SCC. *J. Mater. Eng. Struc.* 5, 47–55, 2018.
- [35] KAZI AOUAL-BENSLAFA, F. ; MAAROUF, H. ; SEMCHA, A. ; MEKERTA, B. «Durabilité des mortiers à base de sédiments de dragage du port d’Oran». Mediterranean Coastal and Maritime Conference Edition 2, Tangier, Morocco 2011. <http://www.paralia.fr>.
- [36] FRACHEBOURG J., «Contribution à l'étude de quelques Pouzzolanes naturelles et artificielles en vue de la fabrication des ciments de Pouzzolanes». Thèse Doctorat Es Sciences, Ecole Polytechnique, université de Lausanne .1965, 136p.
- [37] MESSI A., «Propriétés des ciments pouzzolaniques élaborés à partir de latérites activées thermiquement». Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 1988, 256 p.
- [38] GOMES S., «Caractérisation et compréhension des processus d’hydratation des cendres volantes des centrales thermiques françaises équipée d’un système de désulfuration». Thèse de doctorat de l’Université de Nancy-France, (1998).
- [39] SIAD H., «Influence du type d’addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants». Thèse de doctorat, INSA de Rennes-France, 2010.
- [40] BELARIBI O., « Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane ». Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise et Université de Mostaganem.2015.
- [41] BELGUESMIA K., «Optimisation d’un éco-BAP à base de sédiment de dragage vis-à-vis des états frais, durci et de la durabilité». Thèse de doctorat, Université des sciences et de technologie, Mostaganem, 2018.
- [42] 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).
- [43] BELARIBI O., BELAS N., AGGOUN S., BENDANI K., BOUHAMOU1 N., MEBROUKI A., «Enhancing the value of dam dredged sediments as a component of a self-compacting concrete». Cement, Wappo, Beton, November 2014.
- [44] SAFER O., « Optimisation de la formulation d’un éco-béton à base de sédiments de dragage et étude de sa résistance aux attaques chimiques ». Thèse de Doctorat, Faculté des sciences et de Technologie, Université de Mostaganem, 2017.

- [45] **MOSTEFA F.**, « Étude du comportement d'un béton Autoplaçant à base de sédiment de dragage vis-à-vis du retrait ». Thèse de Magister, Faculté des sciences et de Technologie, Université de Mostaganem, 2012.
- [46] **TAIEB F., BELAS N., BELARIBI O., BELGUESMIA K., HADJ SADOK R.**, « Influence de la vase calcinée sur la cinétique d'hydratation semi adiabatique et les propriétés mécaniques des bétons autoplaçants», 4 th International Conference of Energy, Materials, applied Energetics and pollution, Constantine, Algeria, 2018.
- [47] **ONDOVA, M., STEVULOVA, N., ZELENKOVA, E.**,³ “Energy savings and environmental benefits of fly ash utilization as partial cement replacement in the process of pavement building”. Chem. Eng. Trans. 25, 297-302, 2011.
- [48] **PONIKIEWSKI, T., GOLASZEWSKI, J.**, “The influence of high-calcium fly ash on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete and high performance self-compacting concrete”. J. Clean. Prod. 72 (1), 212e221, 2014.
- [49] **SONEBI M., BAHADORI-JAHROMI A., BARTOS P.J.M.**, «Development and optimization of medium strength self-compacting concrete by using pulverized fly ash», 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 514-524, 2003.
- [50] **PARK C.K., NOH M.H., PARK T.H.**, «Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures». Cement and Concrete Research, 35, 842-849, 2005.
- [51] **SHADLE R., SOMERVILLE S.**, «The Benefits of Utilizing Fly Ash in Producing Self- Compacting Concrete». First North American Conference on the Design and Use of Self- Consolidating Concrete, Chicago, IL: ACBM, 235-241. 2002.
- [52] **FERRARIS C.F., OBLA KH., et HILL R.**, «Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete». Cement and concrete research, 2001, vol 31, pp245-255.
- [53] **BENAMARA L., OUHBA K., HAMWI A.**, « Élaboration d'une pouzzolane de synthèse à partir des sédiments de barrage ». Déchets Sciences et Techniques - N°65 - Novembre 2013.
- [54] **GNIEWEK J.**, « Réactivité des montmorillonites calcinées utilisation dans le génie civil ». Thèse de Doctorat Es-Sciences, INSA de Lyon, pp. 184, 1987.

- [55] AMAR M., BENZERZOUR M., ABRIAK N., «Towards the establishment of formulation laws for sediment-based mortars». *Journal of Building Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.12.011>.
- [56] AOUAL-BENSLAFA F.K., KERDAL D., AMEUR M., MEKERTA B., SEMCHA A., «Durability of Mortars Made with Dredged Sediments». *Procedia Eng.* 118 (2015) 240–250. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.423.
- [57] ROZIÈRE E., SAMARA M., LOUKILI A., DAMIDOT D., «Valorisation of sediments in self-consolidating concrete: Mix-design and microstructure». *Constr. Build. Mater.* 81 (2015) 1–10. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.080.
- [58] DANG T.A., KAMALI-BERNARD S., PRINCE W.A., «Design of new blended cement based on marine dredged sediment». *Constr. Build. Mater.* 41 (2013) 602–611. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.088.
- [59] CHIKOUCHE M.A., GHORBEL E., BIBI M., «The possibility of using dredging sludge in manufacturing cements: Optimization of heat treatment cycle and ratio replacement». *Constr. Build. Mater.* 106 (2016) 330–341. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.128.
- [60] GHRICI M., KENAI S., SAID-MANSOUR M., «Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements». *Cem. Concr. Compos.* 29 (2007) 542–549. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.04.009.
- [61] SAFHI A., BENZERZOUR M., RIVARD P., ABRIAK N., Development of self-compacting mortars based on treated marine sediments, *Journal of building engineering*, 22 (2019) 252-261.
- [62] DINAKAR P., BABU K.G., SANTHANAM M., «Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes». *Cement and Concrete Composites*, 30 (2008), pp. 880–886.
- [63] FELEKOGLU B., YARDIMCI M., BARADAN B., «A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self compacting concrete», proceeding of Third international symposium on SCC: Reykjavik 446-455, 2003.
- [64] KOEHLER E.P., «Aggregates in Self-Consolidating Concrete». Thèse de doctorat. Université de Texas à Austin, 2007.

- [65] **OBLA K.H., HILL R.H., THOMAS M.D.A., SHASHIPRAKASH S.G., and PEREBATOVA O.**, «Properties of Concrete Containing Ultra-Fine Fly Ash». *ACI Materials Journal*, 100(5), 426-433. 2003.
- [66] **PATEL R., HOSSAIN K.M.A., SHEHATA M., BOUZOUBAA N., and LACHEMI, M.**, «Development of Statistical Models for Mixture Design of High-Volume Fly Ash Self-Consolidating Concrete». *ACI Materials Journal*, 101(4), 294-302, 2004.
- [67] **CHRISTENSEN B.J., and ONG F.S.**, «The Performance of High-Volume Fly Ash Self-Consolidating Concrete» *Proceedings of SCC-2005*, Chicago, IL: ACBM.
- [68] **KHATIB J.M.**, «Performance of self-compacting concrete containing fly ash». *Construction and Building Materials* 22 (2008) 1963–1971.
- [69] **BELAS N., BESSEGHIER N., MEBROUKI A., & BOUHAMOU N.**, «To words a protection of the environment by valorizing the silt of stopping as concrete component». *Materials & Techniques*, 97(4), 231–240. 2009.
- [70] **DRUTA C.**, «Tensile strength and bonding characteristics of self-compacting concrete», *Thèse de doctorat*, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2003.
- [71] **ZHAO H., SUN W., WU X., GAO B.**, «The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures». *Journal of Cleaner Production* 95 (2015) 66e74.

CHAPITRE II.

COMPORTEMENT DIFFÉRÉ LIBRE ET EMPÊCHÉ

CHAPITRE II. COMPORTEMENT DIFFÉRÉ LIBRE ET EMPÊCHÉ

II.1. INTRODUCTION

Dès l'apparition des mortiers autoplaçants équivalents (MBAPE), la lumière a été projetée sur leur susceptibilité à développer un retrait plus important que les mortiers dits normaux. Cette crainte serait due à la nature particulière de la formulation des MBAPE avec des volumes de pâte plus élevés même si le rapport eau / ciment est plus faible [1]. Dès lors il nous a semblé intéressant d'approfondir nos connaissances vis-à-vis de cette caractéristique, en effectuant un état de l'art sur lequel nous allons nous baser pour établir un programme expérimental qui éclaircirait quelques points sur le retrait des mortiers autoplaçants.

Depuis les premières études sur la fissuration des matériaux cimentaires, le retrait a toujours été désigné comme une cause principale [2]. Ainsi pour l'étude de la sensibilité des MBAPE à la fissuration il est nécessaire de bien étudier et caractériser cette notion de retrait : des méthodes expérimentales bien réfléchies ainsi qu'une bonne interprétation des résultats sont obligatoires pour tirer des conclusions fiables.

Le retrait des mortiers autoplaçants peut avoir des causes différentes et dépend des conditions environnantes, d'où les nominations multiples de ce dernier : retrait plastique, retrait endogène, retrait empêché et retrait de dessiccation. Notre problématique concerne le comportement des MBAPE contenant deux additions minérales (vase calcinée et cendres volantes) vis-à-vis du retrait à court et à long terme, nous allons plutôt se focaliser sur l'influence de sédiments traités par calcination à 750°C pendant 5 heures sur le retrait plastique, retrait libre et la fissuration due au retrait empêché. Ceux-ci sont directement liés à la durabilité du mortier.

L'objectif de ce chapitre est d'établir un état des connaissances actuelles sur les recherches consacrées à l'étude des déformations différées libres des mortiers et des bétons.

II.2. RISQUE DE FISSURATION AU JEUNE ÂGE

Le retrait est globalement divisé en deux phases, le retrait au jeune âge, qui apparaît dans les premières 24 heures et le retrait à long terme, qui se produit après 24 heures [3]. Généralement, le retrait au jeune âge est négligeable par rapport au retrait de séchage à long terme [3].

On parle de « jeune âge » pour désigner la période qui s'écoule du malaxage des constituants du mortier ou du béton aux premiers jours qui suivent sa mise en œuvre. D'abord à l'état d'une suspension de consistance plus ou moins liquide, le matériau cimentaire va se solidifier progressivement sous l'effet de l'hydratation du ciment. On qualifie de « prise » la transition entre l'état « liquide » et l'état « solide ». Après la prise, l'hydratation se poursuit à un rythme rapide puis ralentit ; le matériau cimentaire voit sa résistance augmenter [4]. On parle de durcissement.

Le jeune âge est une période complexe car le matériau va y connaître de grandes transformations qui peuvent se traduire parfois par une fissuration qui pourra avoir des conséquences sur la durabilité des structures [4].

II.2.1. Retrait plastique

Un résumé des études antérieures sur le retrait plastique et la fissuration due au retrait plastique est présenté. L'origine du retrait plastique est d'abord examinée, les conséquences de ce retrait, ensuite les facteurs qui influent sur la fissuration de retrait plastique et la prévention seront présents. Enfin, les principales méthodes expérimentales développées dans la littérature relatives à la mesure du retrait plastique seront décrites.

II.2.1.1. Origine

Le retrait plastique est une contraction du béton ou mortier à l'état frais conséquence d'une dessiccation avant prise. Les grains solides se déplacent vers le bas et les bulles d'air remontent vers le haut, c'est la consolidation du matériau (figure II.1.a). Le résultat de cette consolidation par l'effet de la gravité est le tassement. Lorsque la quantité d'eau qui s'évapore à la surface du béton ou mortier est supérieure à la quantité d'eau de ressuage [5] (figure II.1.b), un système complexe de ménisques se développe entre les grains solides (figure II.2.), selon la relation de Laplace, il en résulte une dépression capillaire et des efforts entre grains qui tendent à compacter le squelette granulaire [6-8]

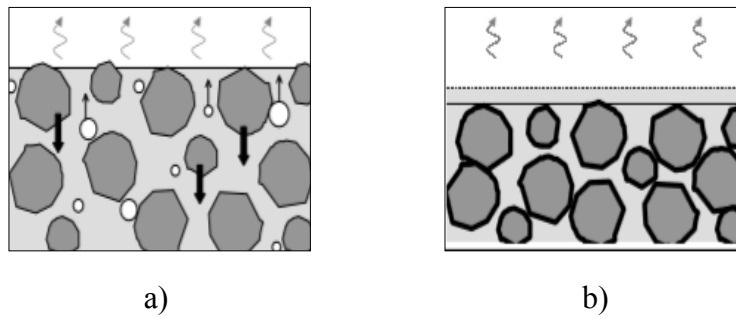


Figure II.1. Consolidation d'une pâte de ciment : a) Sédimentation des grains solides) b) Apparition d'une couche d'eau à la surface (ressuage) [9]

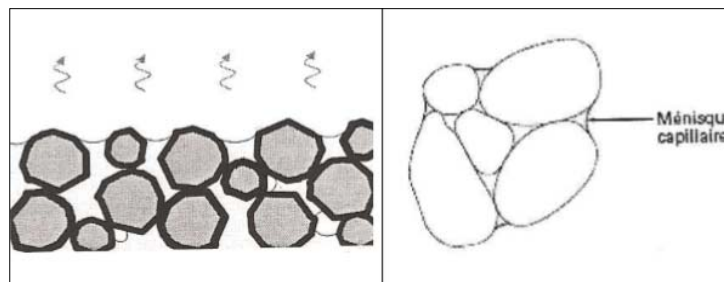


Figure II. 2. Ménisques entre grains de ciment provoqués par un séchage de la surface [10]

Ces ménisques capillaires, correspondant à la succion, qui n'est autre que la pression capillaire, engendrent une attraction entre les grains.

La variation de pression d'eau, consécutive à la formation d'un ménisque, est négative. Les pores deviennent de plus en plus petits sous l'action de la pression capillaire et l'eau interstitielle apparaît en surface [11]. La pression capillaire ne s'applique que sur la surface mouillée des grains. Cette dernière est d'autant plus faible que la pression capillaire est grande. Le retrait commence lorsque la pression capillaire, à l'intérieur de la phase liquide, se développe tout en exerçant une pression négative, qui entraîne des contraintes verticales et horizontales. Elle augmente à vitesse croissante jusqu'à ce qu'elle atteigne un maximum, c'est la pression maximale ou pression capillaire critique. Une fois la pression maximale atteinte, elle diminue rapidement [12]. L'air pénètre dans le système poreux, en commençant par les plus gros pores, le système devient ainsi instable. La vitesse de retrait augmente avec la pression capillaire, et se stabilise après que la pression maximale soit atteinte. Ainsi, l'eau restante ne peut pas remplir tous les vides dans le système dispersé, plus longtemps. Elle est maintenue dans de petits capillaires et dans les ménisques. Le développement de la pression capillaire dans le matériau frais, ne dépend pas uniquement de l'évaporation, mais aussi de la

distribution de la taille (la structure) des particules, notamment des pores [13]. Plus l'espace entre les particules est petit, plus l'élévation de pression pour une évaporation donnée est importante.

La pression capillaire peut être décrite par les équations de Laplace et de Kelvin. Les lois de Laplace et de Kelvin sont établies à partir de l'équilibre mécanique et thermodynamique entre eau liquide, eau vapeur et le solide (figure II. 3) La loi de Laplace s'écrit :

$$P_g - P_l = \frac{2\sigma}{r} \cos(\theta) \quad \text{II. 1}$$

P_g : pression de la phase gazeuse (air + vapeur d'eau). En s'appuyant sur la loi de Dalton, on peut écrire $P_g = P_a + P_v$

P_a : pression partielle de l'air, (sec)

P_v : pression partielle de vapeur d'eau,

P_l : pression de l'eau liquide,

σ : tension superficielle de l'interface liquide/gaz

r : rayon du pore où le ménisque existe

θ : angle de mouillage

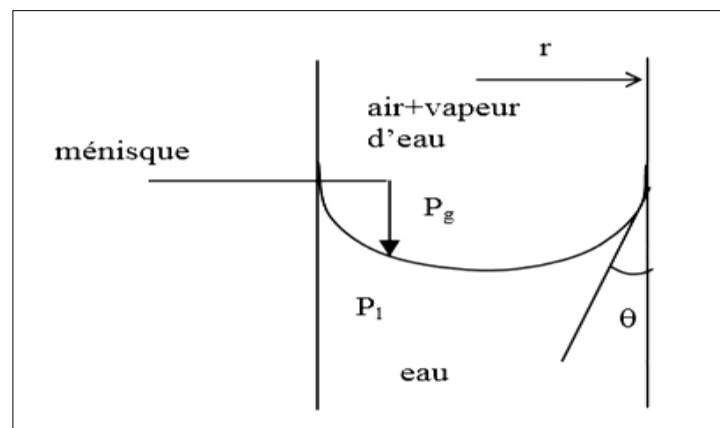


Figure II.3. Représentation schématique d'un ménisque au cours du séchage [14].

La loi de Kelvin relie la pression capillaire ($P_g - P_l$) à l'humidité relative interne du matériau selon la relation suivante :

$$F_g - F_l = \frac{-RT\rho_l}{M} \ln(IHR)$$

II. 2

M : Masse molaire de l'eau,

R : Constante des gaz parfaits,

T : Température absolue,

ρ_l : Masse volumique de l'eau,

HR : Humidité relative interne du matériau.

La figure II.4 présente les déformations plastiques et l'évolution microstructurale d'une pâte de ciment pendant les heures suivant le coulage.

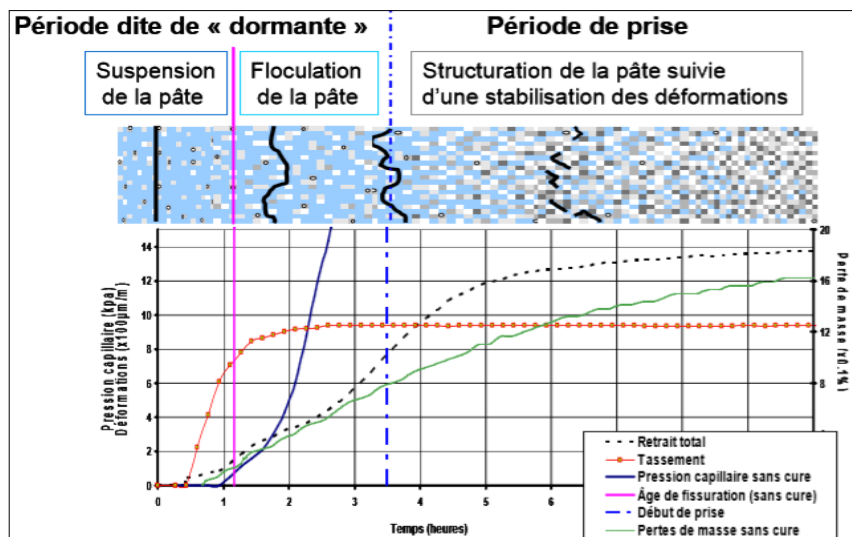


Figure II. 4. Evolution microstructurale d'une pâte de ciment [10]

Ainsi, il est possible de distinguer trois principales phases :

- Avant la fissuration (cette phase traduit la consolidation de la pâte de ciment),
- Avant la prise (cette phase traduit la dessiccation de la pâte de ciment),
- Pendant la prise de la pâte (cette phase traduit la structuration de la pâte de ciment) [10].

La figure II.5 donne l'exemple des déformations -tassement et retrait plastique-mesurées pendant les heures suivant le coulage. Le retrait plastique se développe pendant les phases (1) et (2) et voit sa vitesse s'annuler pendant la prise (3).

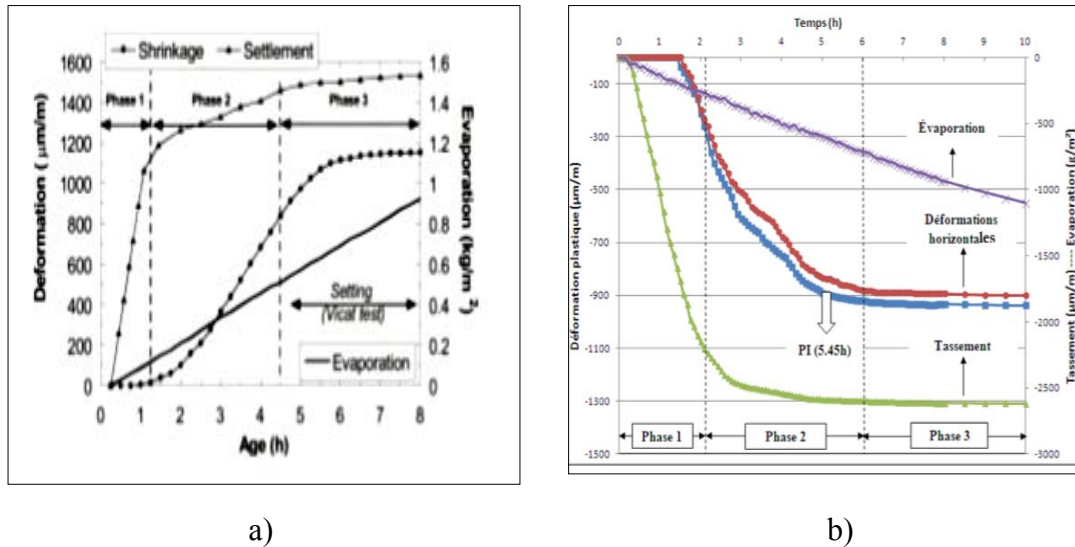


Figure II. 5. a) Développement du retrait plastique, du tassement et de l'évaporation pour des conditions sans vent (mélange BAP3) [15] b) Évolution du retrait plastique, du tassement et du taux d'évaporation au cours du temps (PI : prise initiale) [16]

II.2.1.2. Conséquence

Comme le montrent les données expérimentales de la figure II.5 le retrait plastique peut avoir une amplitude très élevée. Cette déformation n'a pas nécessairement de conséquence car, à l'état frais, le béton ou le mortier est encore très déformable.

Néanmoins, il y a risque de fissuration lorsque le retrait plastique dépasse la capacité de déformation du matériau. Le lien entre le retrait et la fissuration est fait dans la littérature avec la notion de capacité de déformation [17,18]. La capacité de déformation est définie comme la déformation maximale qu'est capable de supporter le matériau frais en traction. La fissuration à l'état frais est donc atteinte lorsque le retrait empêché dépasse cette limite en déformation.

La figure II.6 schématise le principe. La capacité de déformation de matériau cimentaire frais diminue jusqu'à la prise, parce que l'eau interstitielle est consommée par l'hydratation et le séchage, ou encore parce que l'effet d'un éventuel adjuvant s'amenuise dans le temps. La

diminution de la capacité de déformation est d'ailleurs à mettre en parallèle de la perte d'ouvrabilité du matériau [19]. Selon certains auteurs, le risque de fissuration devient significatif pour un retrait supérieur à $1000\mu\text{m/m}$ [20-22].

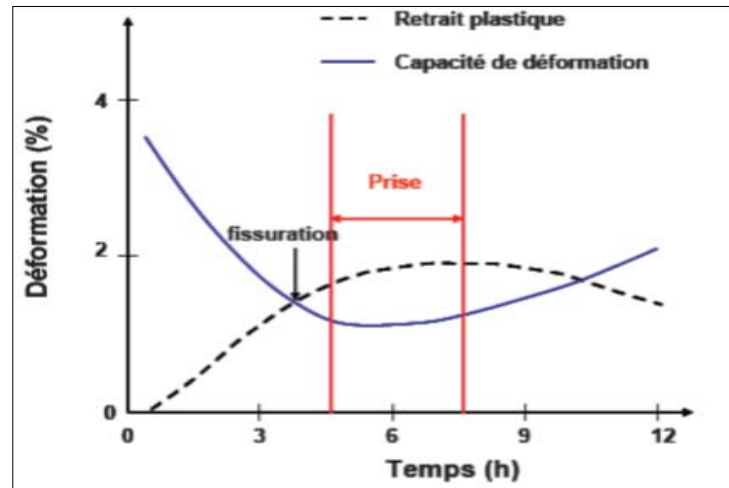


Figure II. 6. Schématisation de la fissuration à l'état frais, en termes de retrait et capacité de déformation [23].

Dans les règles de l'art, notamment américaines, on estime que le risque de fissuration est grand quand le taux d'évaporation, exprimé par unité de surface soumise au séchage, dépasse 1kg/m^2 par heure. Il existe d'ailleurs des formules et des abaques (figure II.7) pour estimer le taux d'évaporation en fonction des conditions climatiques et de la température du béton [20].

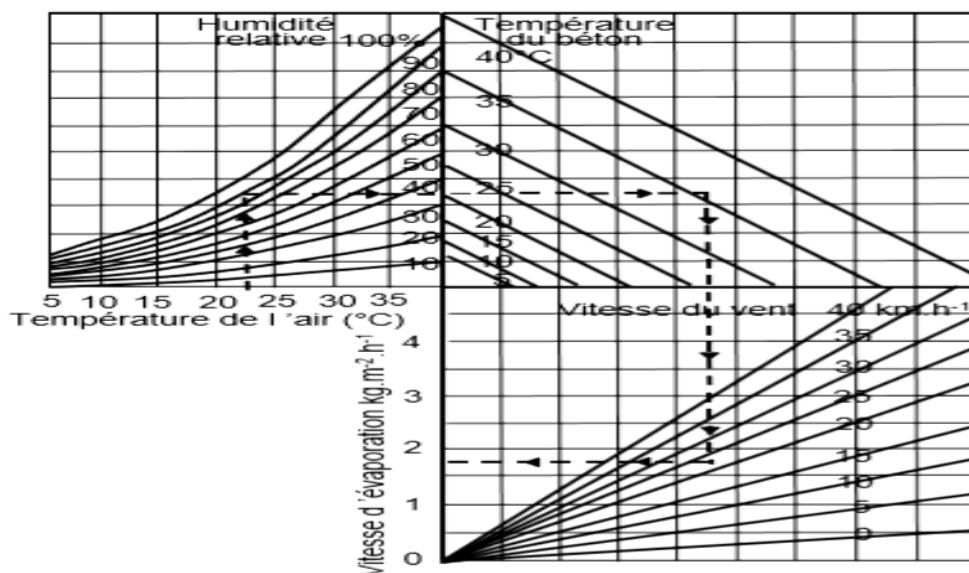


Figure II. 7. Abaque pour l'estimation de la vitesse d'évaporation de l'eau [24]

II.2.1.3. Facteurs et prévention

Le retrait plastique dépend de la vitesse d'évaporation à la surface du mortier ou du béton. La vitesse du vent, la température et l'humidité relative ambiante, le rayonnement solaire sont autant de facteurs qui contrôlent l'évaporation. La composition du béton ou du mortier a également une influence non négligeable. Ainsi, les mortiers ou les bétons qui ressuent peu- par exemple à cause d'un faible rapport eau sur fines- ou qui ont une prise tardive-à cause de l'adjuvantation ou d'une hydratation lente -sont des matériaux qui présentent typiquement un fort retrait plastique. Dans cette catégorie, citons les bétons et les mortiers autoplaçants, les bétons et les mortiers formulés avec des laitiers de haut -fourneau.

Le principal moyen d'action contre le retrait plastique et l'éventuelle fissuration est la prévention de la dessiccation précoce. Il convient de réaliser une cure en humidifiant les surfaces (Figure II.8.), en les protégeant par un film polyane ou en pulvérisant un produit de cure efficace.



Figure II.8. Exemple de cure par aspersion d'eau en surface d'une dalle coulée en été [5].

II.2.1.4. Techniques de mesures du retrait plastique

Il existe différentes méthodes de mesure du retrait plastique en laboratoire [25-29]. Nous analyserons ici le phénomène sur la base de résultats obtenus avec le dispositif schématisé sur la figure II. 9 [9,15]. En cours d'essai, en plus de la mesure du retrait (déformation horizontale) sont effectués : un suivi de masse (nécessaire pour déterminer le taux d'évaporation) ; une mesure de température (information utile pour la détermination de la fin de prise) ; une mesure du tassement (déformation verticale) ; une mesure de la dépression capillaire à l'aide d'un capteur de pression plongé au cœur du matériau cimentaire.

➤ *Mesure des déformations plastiques*

Pour la mesure du retrait plastique, il y a une méthode linéique, qui permet de déterminer à la fois l'effet du séchage et l'effet de l'hydratation.

Le principe de cette méthode consiste à enregistrer les variations dimensionnelles d'une éprouvette prismatique de pâte de ciment, ou de mortier, ou de béton, dans une direction horizontale. Le retrait est exprimé sous la forme :

$$\varepsilon(t) = \frac{L_t - L_0}{L_0} \quad \text{II.3}$$

Avec :

L_t : La longueur de l'éprouvette à l'instant t de la mesure

L_0 : La longueur initiale.

Il est encore difficile de mesurer le retrait plastique, et pas de méthode normalisée n'existe pour évaluer le retrait plastique libre [30].

Dans les travaux de Turcry [15], le dispositif est composé d'un moule prismatique en acier (A) de dimensions 7x7x28 cm, dont les parois intérieures sont couvertes d'une feuille de téflon (B) pour minimiser le frottement entre le moule et l'éprouvette. Les ouvertures circulaires aux deux extrémités du moule permettent aux deux sondes laser d'enregistrer les déplacements des deux plaques minces de PVC (C) lorsque l'échantillon de mortier se rétracte. L'utilisation de laser (D) permet d'éviter tout contact entre le mortier frais et le capteur (figure II. 9.a). Bien que cette méthode de mesure sans contact du retrait plastique soit élégante, elle ne donne qu'une déformation à la mi-hauteur de l'échantillon et ne rend pas compte du retrait plus important à la surface [31].

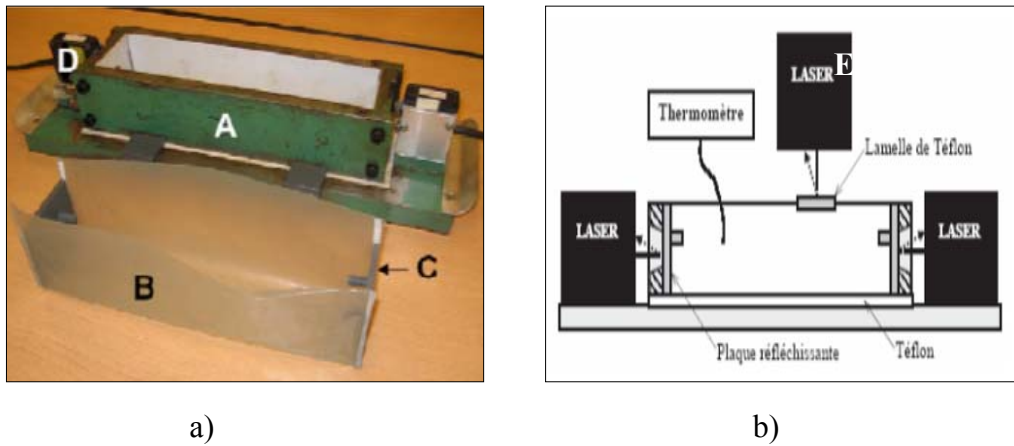


Figure II. 9. a) Le banc de mesure du retrait plastique b) Coupe du moule de retrait plastique [16]

Le retrait plastique, exprimé en $\mu\text{m}/\text{m}$, est déduit de la somme des déplacements des deux plaques, divisée par la longueur de l'échantillon [31].

Le capteur laser (E), placé au-dessus de l'échantillon, permet de mesurer le déplacement d'un carré de Téflon, de 1 cm de côté et 1 mm d'épaisseur, déposée à la surface du matériau. Le déplacement du carré rapporté à la hauteur de l'échantillon nous donne le tassement, exprimé en $\mu\text{m}/\text{m}$. Un thermocouple placé à mi-hauteur de l'échantillon est utilisé pour mesurer la température au sein du matériau [31] (figure II. 9.b).

➤ *Mesure du taux d'évaporation*

Pendant la mesure du retrait plastique avec séchage, on suit également l'évaporation de la masse d'un échantillon cylindrique, de diamètre 11 cm et de hauteur de 7 cm (figure II. 10). La perte de masse divisée par la surface du cylindre nous donne l'évaporation, exprimée en Kg/m^2 [31].

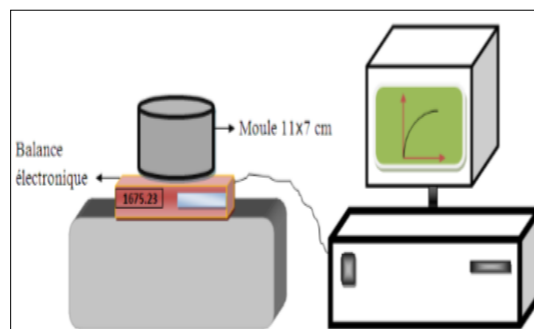


Figure II. 10. Schéma du dispositif de la mesure de la perte de masse [16]

➤ *Mesure de la dépression capillaire*

Le dispositif schématisé sur la figure II.11 est utilisé pour mesurer la pression de l'eau capillaire. Deux céramiques poreuses reliées à des capteurs de pression placées à 10 et 35 mm de la surface d'un échantillon, de mêmes dimensions celui de l'essai de perte de masse. Le capteur et le tube reliant capteur et céramique que sont remplis d'eau désaérée avant l'essai avec une pompe à vide. La mesure se termine lorsque la diminution de pression mène à une vaporisation de l'eau interstitielle. La céramique se trouve alors en contact avec une phase gazeuse et une phase liquide ; une bulle de vapeur a d'ailleurs tendance à remonter dans le tube du capteur. A cette échéance, la mesure n'est plus possible ; la courbe de pression retourne à zéro, comme décrit dans la littérature [32].

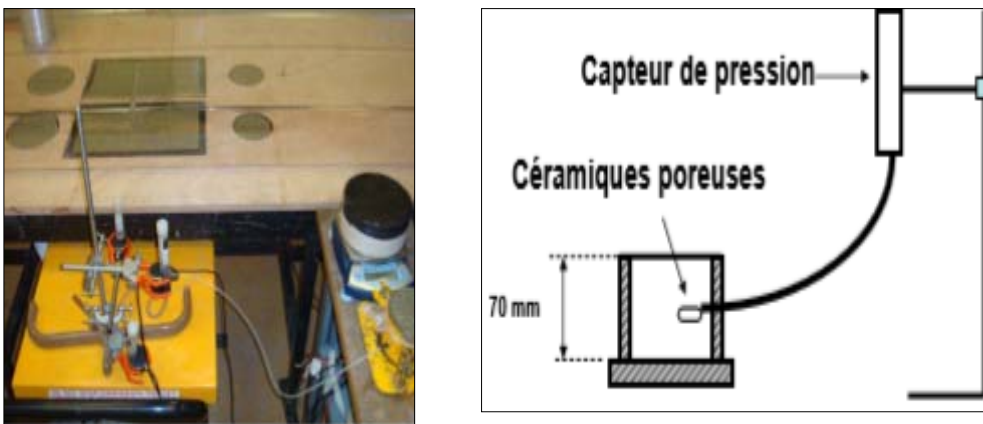


Figure II.11. Présentation de dispositif de la mesure de la pression capillaire [10]

II.2.2. Retrait thermique

Le retrait thermique est la contraction liée à l'exothermie des réactions d'hydratation du ciment et donc à l'élévation de température, particulièrement importante pour les pièces massives. La cinétique du dégagement de chaleur est telle que la température est à son maximum au moment de la prise et le refroidissement intervient après le durcissement. La contrainte résiduelle s'exprime en traction du fait de la différence des modules d'élasticité entre avant et après la prise [5].

Pour limiter ces effets adverses, on peut utiliser un ciment adapté, c'est-à-dire à basse teneur en C₃A et à finesse de mouture modérée (c'est-à-dire un ciment à performance \ modérée) ou

encore un ciment composé (ou combiné avec une addition à réaction lente), utiliser un adjuvant réducteur d'eau ou encore refroidir le béton [5].

II.2.3. Dispositifs de fissuration à l'état frais

À ce jour, il n'existe toujours pas de méthode standard pour mesurer la fissuration de retrait au jeune âge.

➤ *Dispositif de fissuration pour mortier*

Le dispositif pour mortier est une plaque carrée de 20 cm de côté et d'épaisseur 1 cm. Pour empêcher le retrait plastique, le fond du moule est pourvu de dents de 0,5 cm de haut (figure II. 12.a). L'essai se déroule dans la salle climatisée avec ou sans ventilateur à côté du moule (figure II. 12.b). En fin d'essai, huit heures après la fabrication, on relève sur un calque le tracé des fissures. Pour chacune d'elles, on mesure la longueur et la largeur maximale avec une lentille graduée de précision $\pm 10\mu\text{m}$. L'amplitude de la fissuration est la somme des aires des fissures, calculées comme le produit de la longueur et la largeur maximale [15].

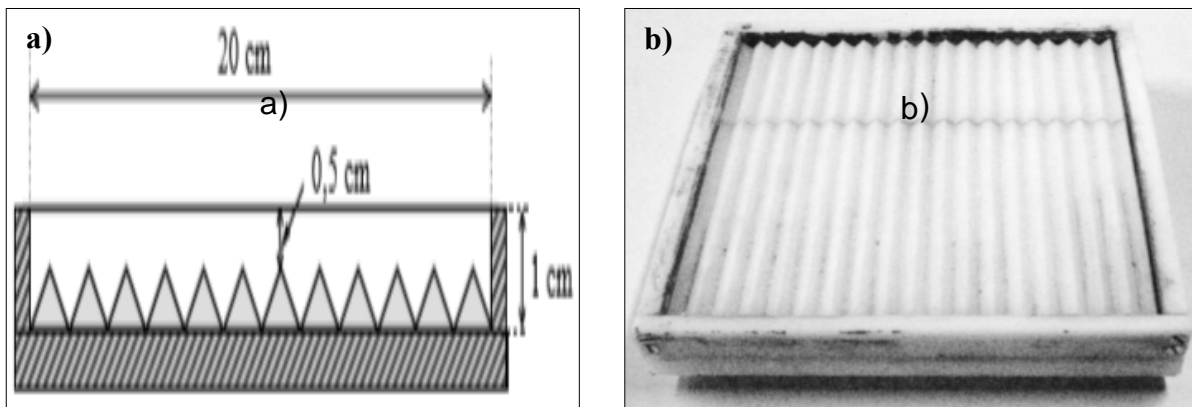


Figure II. 12. a) Vue en coupe du dispositif de fissuration des mortiers, b) Dispositif de fissuration pour mortier à l'état frais [15]

➤ *Dispositif de fissuration pour béton*

Le dispositif de fissuration conçu par Soroushian et Ravanbakhsh [22], le dispositif utilisé est un moule prismatique de dimensions (40 x 20 x 7 cm³) au fond duquel trois surélévations triangulaires sont placées pour initier la fissuration (figure II. 13). L'essai se déroule dans une salle climatisée à 20°C et 50% d'humidité relative. Un ventilateur est placé à côté de l'échantillon pour forcer le séchage. Notons qu'en l'absence de ventilation le retrait plastique n'est pas suffisant, quel que soit le matériau, pour entraîner une fissuration. Il est d'ailleurs

très difficile de faire fissurer un matériau cimentaire sur des échantillons de taille réduite, comme le sont les échantillons couramment testés en laboratoire, sans séchage forcé [33].

Au cours de l'essai, on mesure l'âge d'apparition de la fissure centrale ; puis, huit heures après la confection, on mesure la largeur maximale de la fissure, à partir de l'image de la fissuration, grâce un logiciel de traitement d'image [10]. L'amplitude de la fissuration est l'aire de fissuration, calculée comme le produit de la longueur et la largeur maximale. Les résultats sont ensuite représentés graphiquement afin de pouvoir corrélérer l'âge d'apparition des fissures et l'aire de fissuration [10].

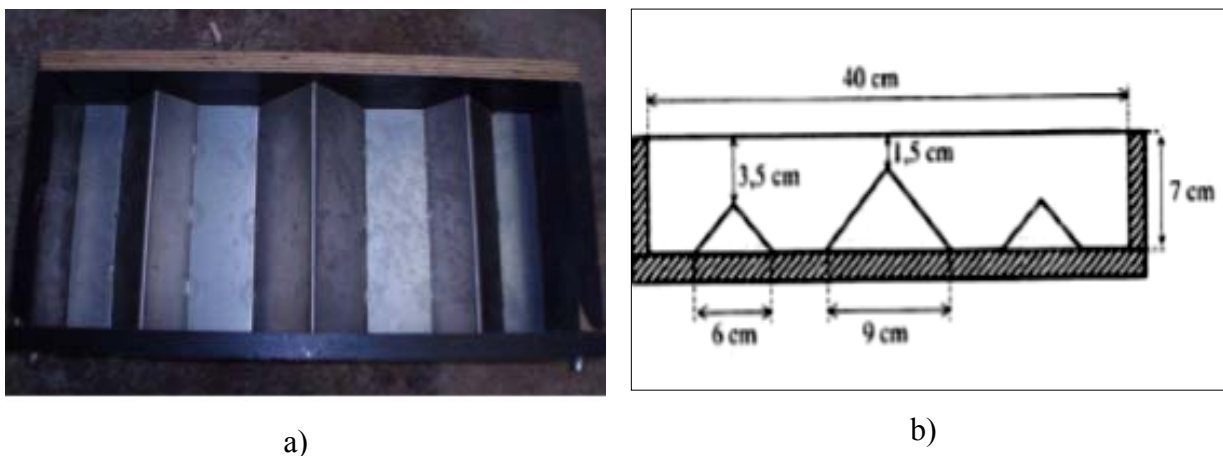


Figure II. 13. a) Dispositif de fissuration pour béton à l'état frais, b) Vue en coupe du dispositif de fissuration des bétons [10]

II.3. DÉFORMATIONS DIFFÉRÉES LIBRES

II.3.1. Le retrait libre

Le retrait correspond à l'ensemble des phénomènes qui engendrent une contraction de la matrice cimentaire en l'absence de contrainte mécanique extérieure. Nous ne nous intéresserons qu'au retrait à l'état durci et non à ce qui se produit avant la prise. Il existe deux types de retrait que l'on découple habituellement [33].

On parle de retrait endogène si aucun échange hydrique n'est permis avec le milieu ambiant (par exemple comportement au cœur d'un élément massif), lui-même associant différents mécanismes suivants :

- **La contraction de le Chatelier** (retrait chimique) due au volume plus faible des hydrates formés comparé au celui initial de l'eau et du ciment anhydre ;
- **Le retrait d'auto-dessiccation** qui débute lorsque le squelette se forme suite à la prise du ciment et qui est dû aux dépressions capillaires qui se produisent dans les pores se vidant de leur eau consommée par l'hydratation (l'intensité de la contraction étant inversement proportionnelle à la taille des pores [33], suivant la loi de Kelvin-Laplace).
- **Le gonflement structural**, identifié comme une conséquence directe des pressions exercées par les cristaux de portlandite et d'ettringite au cours de leurs croissances lorsqu'ils n'ont pas assez de place pour se développer [34].

Si les échanges hydriques sont possibles, s'ajoute alors au retrait endogène une part de retrait dit de dessiccation ou de séchage (comportement en surface libre de l'élément engendrée par le gradient hydrique entre le matériau et le milieu ambiant). La somme des deux retraits est appelée retrait total [33].

II.3.1.1. Le retrait endogène

a) La contraction de Le Chatelier ou Retrait chimique

Le volume des hydrates formés dans la réaction d'hydratation est nettement inférieur à la somme des volumes des deux constituants, ciment anhydre et eau, qui entre dans la réaction (contraction Le Chatelier), la différence est comprise, selon les ciments, entre 8 et 12% du volume initial (figure II.14). Si un tel retrait se produisait, il créerait de tels désordres que la construction avec du ciment Portland serait impossible, en fait, dès le début de la prise, ce retrait est gêné par la structure naissante. Il est donc d'intensité beaucoup plus faible [35] et peut alors être interprété comme résultant de l'apparition de tensions capillaires liées à un séchage interne (autodessiccation) de la pâte dû à la poursuite de l'hydratation [5]. Le retrait chimique peut varier en fonction de la nature du ciment et des additions dans le béton ou le mortier. Par exemple, la présence de filler de calcaire accélère le retrait chimique par consommation d'eau due à la surface spécifique importante de ces particules [36-39]. La surface spécifique supplémentaire créée par les particules calcaires constitue des sites de nucléation des hydrates. La cristallisation se fait donc plus rapidement.

Le retrait chimique dépend fortement de la nature du ciment. Il est plus important pour un CEM II du fait des additions présentes par rapport à un CEM I [39].

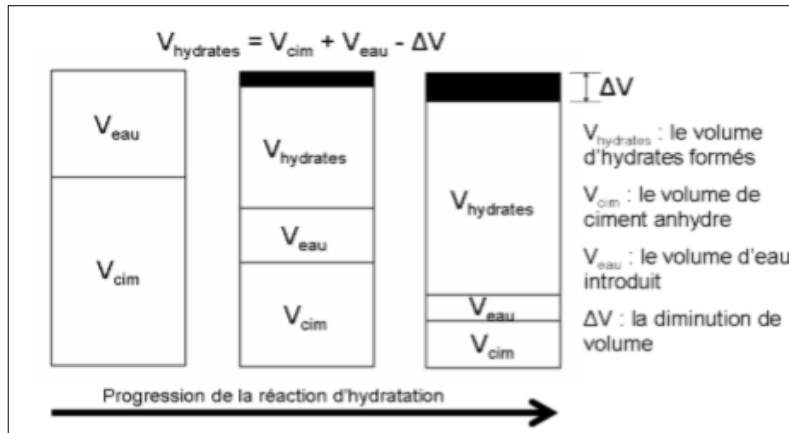


Figure II.14. Schéma de la contraction Le Chatelier [35]

b) Le retrait d'auto-dessiccation

Le retrait d'auto-dessiccation (ou retrait endogène) n'apparaît que lorsque l'hygrométrie relative dans le matériau devient inférieure à 100% et que son intensité dépend de la chute de cette hygrométrie. Le paramètre fondamental sera donc le rapport E/C qui pilote l'eau disponible dans le mortier ou le béton [40]. La figure II.15 montre que les pâtes de ciment de faibles E/C ont une humidité relative interne qui peut descendre jusqu'à 75%, alors que les pâtes de forts E/C gardent une humidité relative interne proche de 100%. Ces dernières ne présenteront donc qu'un faible retrait endogène [41]. La résistance dépendant directement du rapport E/C, ceci explique pourquoi dans l'Eurocode 2 le retrait endogène est proportionnel à la résistance en compression du béton ou mortier [5].

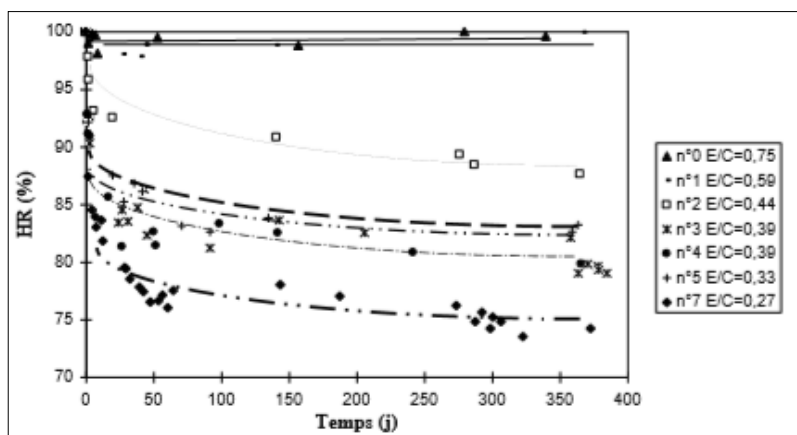


Figure II.15. Evolution de l'humidité interne de pâte de ciment de différents E/C [40]

Ce type de retrait dépend de plusieurs paramètres dont la composition du matériau et la composante fluage sous une pression quasi-constante dans les pores [42].

Trois principaux mécanismes sont généralement avancés pour lier physiquement l'auto dessiccation au retrait obtenu lors du durcissement du matériau cimentaire dans des conditions endogènes :

- Le mécanisme de dépression capillaire, traduisant l'auto dessiccation au sein de la porosité capillaire
- Le mécanisme de variation de tension superficielle, correspondant au départ de l'eau adsorbée sur le squelette solide
- Le mécanisme de variation de pression de disjonction, lié à l'auto dessiccation au sein des nanopores des gels d'hydrates

Sachant que la tension superficielle et la variation des pressions de disjonction ont des effets négligeables sur le retrait endogène [43]

c) Gonflement

Les phénomènes de capillarité sont responsables du gonflement sous l'eau [44]. Par contre, les origines du gonflement qui se produit en conditions isothermes n'ont pas été complètement élucidées. Trois explications ont été proposées : (1) la réabsorption de l'eau de ressuage qui s'accumule en surface de l'échantillon au moment de la prise, en particulier pour les matériaux cimentaires avec des rapports E/C élevés [45]. (2) la formation d'ettringite et la croissance des phases cristallines de la portlandite qui peuvent générer des pressions sur les parois des pores [46-50]. Ce mécanisme s'applique plutôt au mélange avec faible rapport E/C (3). Le gonflement peut être aussi expliqué par le fait que les hydrates formés occupent un volume plus grand que les grains de ciment anhydres qui se sont hydratés [51].

d) Techniques de mesures du retrait endogène

Pour un essai endogène, il est nécessaire d'avoir une étanchéité parfaite de l'échantillon et un contrôle permanent de la température. Il faut de plus démarrer la mesure le plutôt possible. Notamment, une mesure qui démarre à 24h « perd » une partie du phénomène. Les principales familles d'essais sont les essais volumiques (où on mesure une variation de pesée

hydrostatique) et les essais linéiques horizontaux et verticaux, chacune présentant des avantages et inconvénients [5].

Ces essais nécessitent en général d'être couplés à un autre essai afin de déterminer le seuil de percolation mécanique qui donnera le t_0 de la mesure du retrait. Par exemple, pour les essais volumiques, ce moment correspondra à la divergence entre l'essai de retrait endogène et l'essai de contraction Le Chatelier (figure II.16). Pour les essais linéiques, une mesure calorimétrique et/ou ultrasonore peut donner l'indication [5].

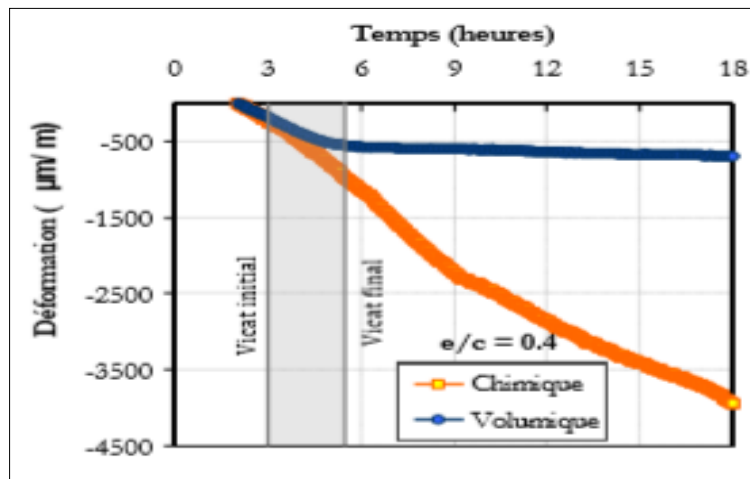
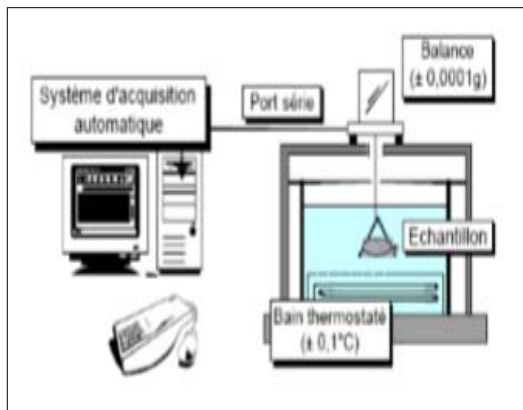


Figure II. 16. Evolution du retrait endogène comparé à la contraction Le Chatelier [52]

- **Les mesures volumiques**

La mesure volumique est utilisée dans le cas endogène [53,54]. Elle est généralement basée sur la technique de pesée hydrostatique [55] où la pâte de ciment (ou le mortier) est placée dans une membrane souple et puis plongée dans l'eau maintenue à température constante (figures II. 17). La variation de volume du matériau est déterminée par pesée hydrostatique.



a)

b)

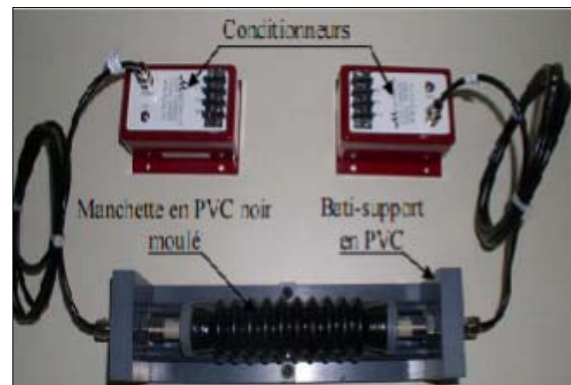
Figure II. 17. Dispositif expérimental de mesure des variations volumiques a) [56]. b) [57]

- *Les mesures linéiques*

Les mesures linéiques des déformations endogènes consistent généralement à mesurer le changement de longueur de l'éprouvette par l'emplacement d'un transducteur au bout de l'échantillon. Deux groupes peuvent être distingués : les mesures verticales et horizontales [58] (figure II. 18)



a)



b)

Figure II. 18. Dispositifs de mesure de retrait endogène linéique a) verticale [59] b)

Horizontal [60].

Les mesures linéiques de déformations endogènes sont très sensibles à la direction de la mesure et les deux configurations de l'essai (vertical ou horizontal) montrent un désaccord entre leurs résultats aux moins dans la période qui précède la prise. Ce phénomène s'explique par une perte d'homogénéité avant la prise dans le cas de la mesure verticale suite à la sédimentation du matériau. Barcelo [61] suppose que la déformation endogène peut ne pas

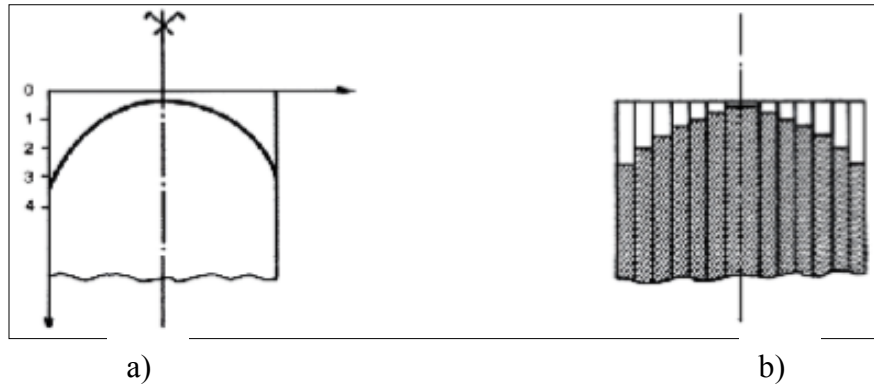
être isotrope même après la prise, et ceci peut expliquer, en partie, la différence entre les deux techniques [58].

II.3.1.2. Le Retrait de dessiccation

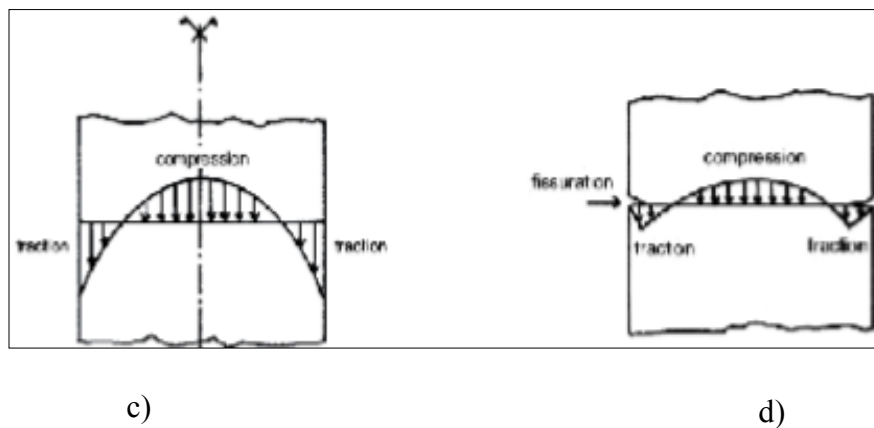
➤ Conséquence du séchage

Comme pour le retrait endogène mais sur des échelles de temps différentes, le séchage naturel du béton ou mortier entraîne l'apparition d'une dépression capillaire qui se traduit par un retrait appelé retrait de dessiccation. La déformation de retrait de dessiccation est la déformation engendrée par la dessiccation du matériau du fait du déséquilibre hygrométrique avec le milieu extérieur (figure II.19a). Des déformations de retrait différentielles incompatibles entre elles sont créées par un fort gradient hydrique (figure II.19b).

Dans le cas d'une structure élancée, les sections restent planes et ce gradient hydrique entraîne donc un gradient de contraintes guidant, par auto-équilibre, des tractions au voisinage de la surface et des compressions au cœur (figure II.19 c). Ces tractions en surface peuvent conduire à une fissuration en peau et donc à une relaxation partielle des contraintes (figure II.19 d). Des déformations de fluage dans la pâte (sous contrainte de provenance seulement hydrique) sont induites par des contraintes de compression au cœur et de traction en surface, qui diminuent l'amplitude de fissuration et relâchent les contraintes [62, 63].



a) Répartition des pertes en eau b) Raccourcissement virtuel



c) Répartition théorique des contraintes d) Répartition des contraintes après fissuration

Figure II.19. Autocontraintes de structure dues au retrait de séchage [64] cité par [65]

L'intensité du retrait de dessiccation dépend bien sûr des paramètres de formulation du matériau, comme les granulats (qui s'opposent au retrait), mais surtout du rapport E/C. En effet, plus ce rapport est faible, plus l'humidité relative interne du béton ou mortier est faible. La figure II.14 montre l'évolution de l'humidité relative interne de pâtes de ciment de différents E/C : les pâtes de ciment de faibles E/C ont une humidité relative interne qui peut descendre jusqu'à 75%, alors que les pâtes de forts E/C gardent une humidité relative interne proche de 100% [40].

Ce phénomène est visible sur la figure II.20 qui montre l'évolution de l'humidité relative interne à l'équilibre en fonction de la résistance en compression. Ainsi, les matériaux de bas E/C n'auront que peu de retrait de dessiccation, car ils auront une faible différence d'humidité interne avec l'extérieur [5].

Cette propriété est traduite dans la loi du retrait de dessiccation figurant l'Eurocode2 partie2 et reprise des travaux de Le Roy 1995[66].

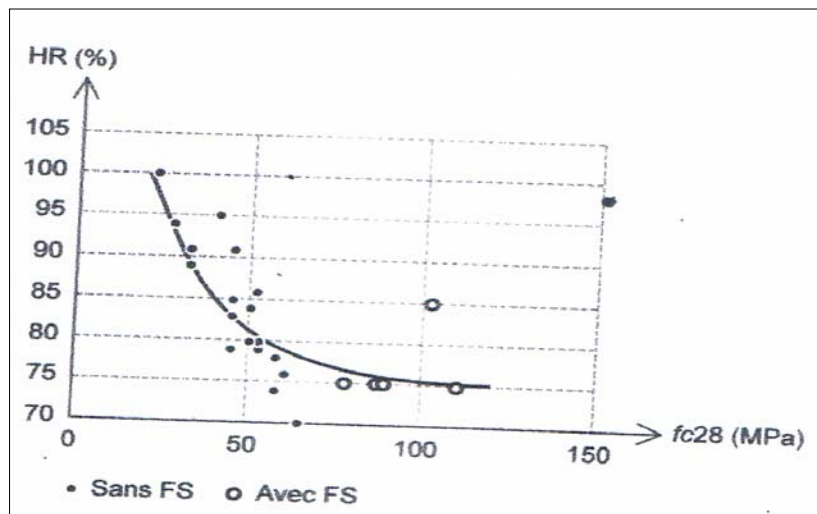


Figure. II.20. Evolution de l'humidité relative interne stabilisée due à l'autodessiccation en fonction de la résistance moyenne en compression [66]

➤ *Conséquences mécaniques du retrait de dessiccation*

Le retrait de dessiccation a des effets mécaniques à trois niveaux différents [67] :

- **À l'échelle des inclusions**, il entraîne une étroite des granulats et un champ de contraintes complexe dans la matrice, ces contraintes initiales permettent d'expliquer divers aspects du comportement mécanique macroscopique (déformations irréversibles, fatigue, hystérésis, etc.) ;
- **À l'échelle des sections**, les gradients de teneur en eau qui apparaissent pendant le séchage entraînent des tractions en peau à l'origine d'un certain nombre de problèmes de fissuration et de non -linéarité (fluage de dessiccation notamment).
- **À l'échelle de la structure**, d'importantes conséquences technologiques résultent du retrait apparent (joint de dilatation, pertes de précontrainte) et des retraits différentiels (dispositions constructives, phasage de bétonnage).

Dans la pratique, la peau du matériau est toujours fissurée, ce qui limite la validité de l'approche par la résistance des matériaux [68]. Cette fissuration a, des effets mécaniques de nature très différente, et notamment : une redistribution du champ de contraintes initiales, une

diminution du retrait apparent, un effet de flexion si la fissuration est dissymétrique. la diminution du retrait apparent peut se voir lorsque l'on exprime le retrait de dessiccation en fonction de la perte en poids. La figure II.21 montre ainsi que le début du séchage ne se traduit que par un faible retrait [69].

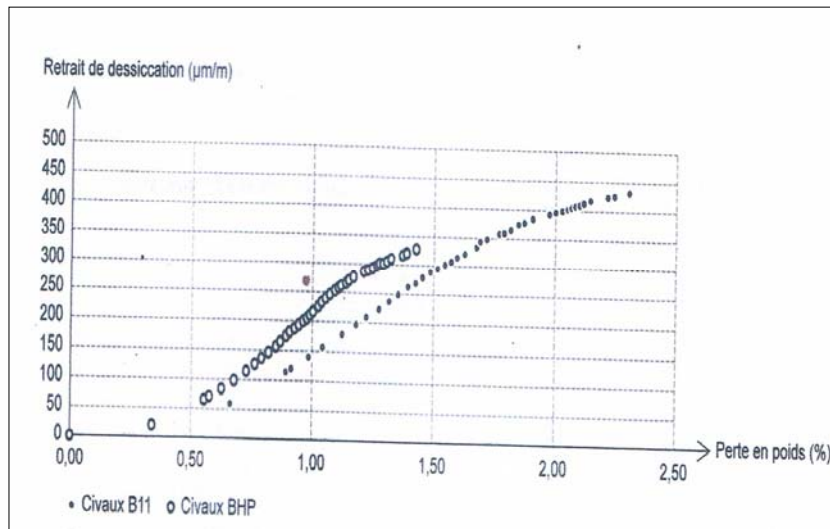


Figure II.21. Relation retrait de dessiccation /perte en poids, exemple de deux bétons [69]

II.3.1.3. Retrait de carbonatation

Lors de l'hydratation du ciment, la chaux présente forme de la Portlandite qui peut, dans certains cas, réagir avec le dioxyde de carbone présent dans l'air. Cette réaction est favorisée par la microfissuration permettant au dioxyde de carbone de pénétrer à l'intérieur du béton. La réaction de carbonatation est régie par l'équation suivante :



II.4

Lors de cette réaction, il y a formation de calcite, et également d'eau qui, si elle est amenée à s'évaporer, peut entraîner une contraction de retrait par dépression capillaire. La réaction de carbonatation est relativement lente et provoque un retrait assez faible pour les humidités extrêmes, c'est-à-dire, soit inférieures à 25%, soit pratiquement à saturation. Le retrait de carbonatation semble maximum pour des humidités relatives avoisinant les 50% [70]. Le retrait de carbonatation peut être atténué par une cure sous eau [71]. Les facteurs principaux qui influent sur le retrait de carbonatation sont la perméabilité du matériau, sa teneur en portlandite, sa teneur en humidité, son rapport E/C ainsi que le taux de dioxyde de carbone dans l'air et l'humidité relative du milieu extérieur [72].

II.3.1.4. Tendances et facteurs influents

On peut classer les recherches en deux groupes, un premier groupe comprenant la majorité des auteurs [73-76], [15], [77, 78] qui concluent que le retrait des BAP, qu'il soit endogène ou en mode dessiccation est du même ordre de grandeur, voir un peu plus élevé mais avec des écarts faibles, que ceux des bétons vibrés de même classe de résistance. En revanche, un deuxième groupe de chercheurs a observé des écarts plus significatifs [79-81], avec des valeurs pouvant être jusqu'à 20% supérieures dans le cas des BAP [82]. Outre les méthodes de mesures et leurs précisions, les conditions d'essais jouent vraisemblablement un rôle dans ces variations de résultats, mais les critères de formulation peuvent expliquer ces retraits par fois équivalents ou plus grands [33].

Plusieurs paramètres spécifiques aux formulations des BAP ou des MBE et dont les influences sont couplées, ont été identifiés :

- Le volume de pâte est le facteur le plus significatif, car c'est dans la matrice cimentaire que se développe le retrait. Ainsi d'après Rozière [83], le retrait total augmente linéairement avec le volume de pâte à rapports E/C et filler /C constant ;
- La quantité d'additions minérales qui densifient la matrice, en diminuant la porosité et la réduction de la taille des pores peut engendrer un retrait endogène plus intense. Ainsi, Staquet et al [84] ont montré qu'un BAP à hautes performances formulé avec de la fumée de silice développait en moins de 48h après la prise une déformation de retrait endogène de plus de 100 $\mu\text{m}/\text{m}$;
- La nature des additions minérales au rapport E/C et filler/C identiques, même quantité d'eau et de granulats des BAP formulés avec différents types de fillers (calcaire, de dolomite, cendre volante, filler quartzeux) ont développé des retraits variables d'après Heirman [85]. Les plus fortes déformations ont été obtenues pour un filler calcaire caractérisé par la plus grande finesse, facteur qui semble influent [86].
- La taille maximale du granulat : plus le granulat est de grande dimension, plus le retrait est réduit. Ce phénomène est évidemment défavorable par rapport au cahier des charges que doit respecter un BAP à l'état frais.
- D'autres facteurs ont un impact important comme le rapport E/C qui contrôle la porosité et la résistance en compression. Un rapport E/C faible tend à intensifier le retrait endogène du fait de la formation de pores de dimensions plus petites, mais

réduit le retrait de dessiccation. Ils ne sont cependant pas spécifiques aux BAP et leur effet demeure effectif de manière similaire aux matériaux cimentaires traditionnels [33].

II.4. DÉFORMATIONS EMPÊCHÉES

II.4.1. Le retrait empêché

Les déformations dues au retrait ne sont pas forcément négatives. Elles ne le deviennent qu'à partir du moment où elles sont entravées, car elles génèrent alors des contraintes de traction. Ces contraintes, si elles dépassent un certain seuil proche de la résistance en traction, peuvent entraîner la fissuration du béton et, par conséquent, des problèmes de durabilité (corrosion, etc.), d'étanchéité ou d'esthétique.

II.4.1.1. Phénomène étudié et caractérisation

Le retrait, lorsqu'il se produit dans des éléments qui sont soumis à des conditions aux limites les empêchant de se déformer librement, peut provoquer des contraintes de traction telles qu'elles engendrent de la fissuration lorsque la résistance en traction du matériau est atteinte. Ce phénomène est dès lors préjudiciable vis-à-vis de la durabilité des structures [33]. Les mesures du retrait libre endogène décrites précédemment nécessitent la connaissance préalable du temps de prise afin de pouvoir isoler les déformations d'auto dessiccation de celles du retrait chimique [87]. Le choix de ce 'temps zéro' étant délicat et incertain, une manière plus fiable de le déterminer sera de se positionner à l'instant d'apparition d'une contrainte interne.

Cette contrainte interne traduit la formation d'un squelette solide poreux capable de résister aux déformations du retrait endogène (et de séchage éventuellement) qui lui sont appliquées [88]. La mesure de cette contrainte nécessite cependant le recours à des dispositifs de mesures plus complexes qui sont capable de bloquer ou empêcher les déformations de retrait au fur et à mesure de leurs apparitions. Ce retrait empêché se traduit alors par la génération d'une contrainte induite qui correspond à l'effort exercé pour annuler les déformations [90]. Plusieurs essais de retrait empêché ont été ainsi mis au point selon la géométrie de l'éprouvette étudiée.

II.4.1.2. Techniques de mesures du retrait empêché

- *Essais en plaques*

Ce type d'essai permet d'avoir une restriction dans deux directions orthogonales. Les déformations ainsi mesurées correspondent aux variations dimensionnelles de l'échantillon dans un plan parallèle à son plan médian sous un état de contrainte biaxiale. L'échantillon peut être assimilé dans ce cas à une large plaque ou dalle restreinte sur tous ses bords. Une alternative de blocage est de créer un frottement uniforme au fond du moule qui peut être assuré par un support rigide avec une surface de contact granulaire ou cranté (cas de reprise de bétonnage par exemple) [88,89]. La figure II.22 [90] représente un exemple de dispositif d'essai du retrait empêché en géométrie plaque.

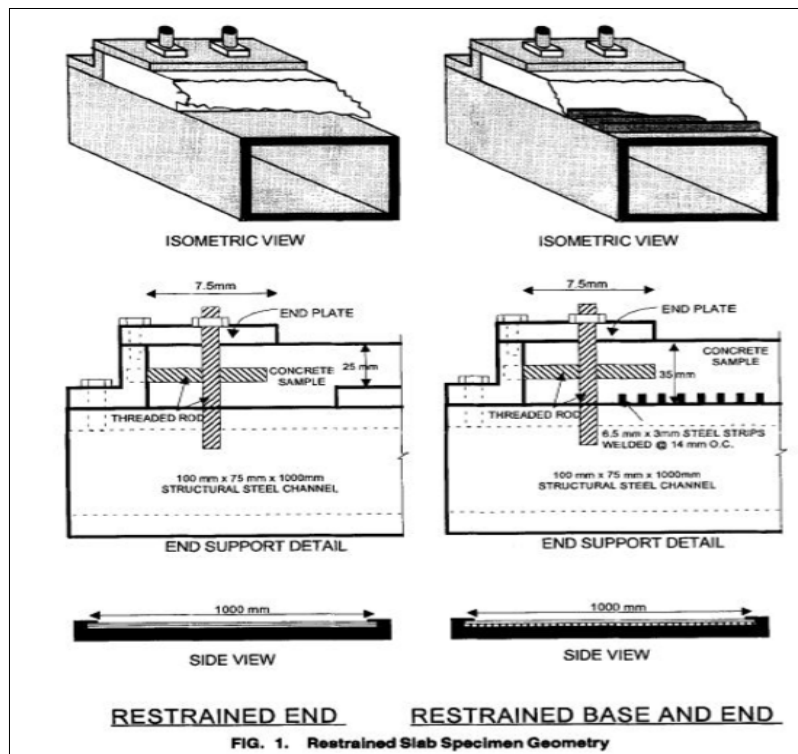


Figure II.22. Dispositif d'essai de retrait empêché sur échantillons en plaques [90]

- *Essais linéiques*

Ce type d'essai consiste à maintenir la longueur d'un échantillon constante, en compensant la déformation à l'aide d'une presse asservie à l'une de ses extrémités. Des mesures de retrait

libre sont réalisées en parallèle sur le même type d'échantillon, dont l'extrémité est cette fois-ci, libre de se déplacer. Il existe également des systèmes couplés, pour les quels, la mesure de retrait libre est réalisée juste avant que la presse ne ramène l'échantillon à sa position initiale [35]. Quelques utilisations de ce genre de dispositif pourront être trouvées dans la littérature [91,93]. La figure II. 23 représente le dispositif de retrait empêché linéique.

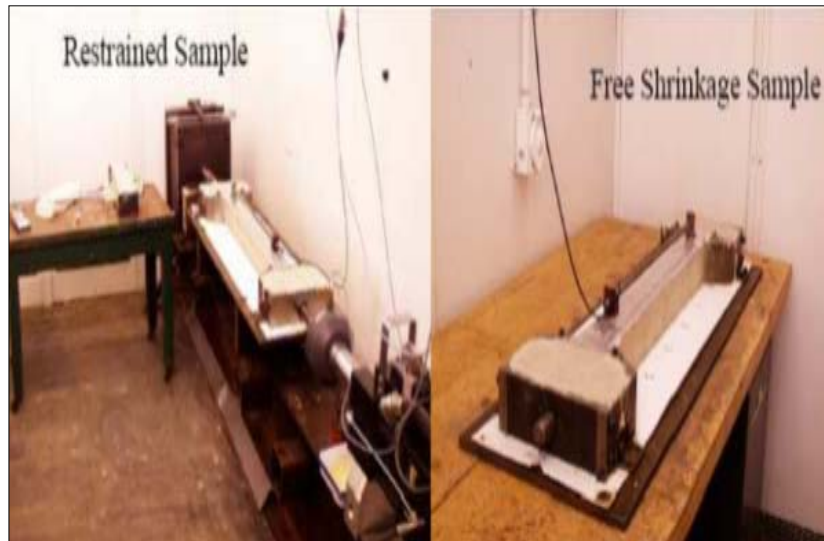


Figure II. 23. Dispositif de retrait empêché linéique [93].

- **Essais à l'anneau**

Le principe de l'essai à l'anneau *ring test* (figure II. 24) réside dans le suivi indirect jusqu'à l'apparition de la fissuration de la déformation d'une éprouvette en forme d'anneau bloquée au niveau de sa surface radiale intérieure par un anneau en acier. Suivant les études, soit les faces supérieures et inférieures [15,83], soit les surfaces radiales sont soumises au séchage [94] conformément à la norme ASTM, 2005[95].

L'exploitation des résultats permet de définir un potentiel de fissuration à partir de la détermination directe de l'âge de fissuration et de paramètres calculés issus de la mécanique de la rupture comme l'énergie de rupture, les valeurs des paramètres caractéristiques à la rupture (CTOD, critical crack tip, ténacité kic), le coefficient de fluage en traction, etc. [33].

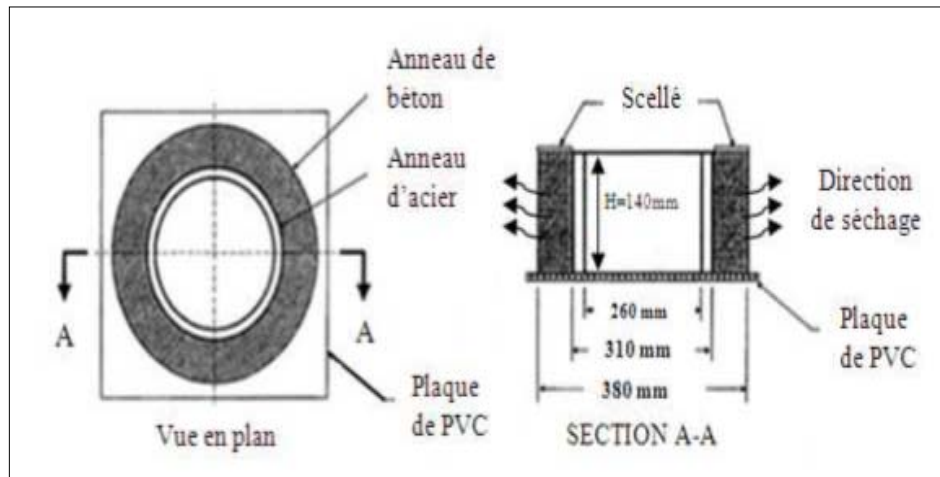


Figure II. 24. Schéma de dispositif expérimental de l'essai à l'anneau [16]

II.4.1.3. Tendances et facteurs influents

Les investigations sur le retrait empêché demeurent rares puisque les règlements ne proposent pas de relations explicites prenant en considération ce phénomène.

A partir des quelques études menées sur le sujet, il semble que le potentiel de fissuration des BAP ou des MBAPE est en moyenne légèrement supérieur à celui des bétons vibrés ou des mortiers normales [15, 94,96], notamment caractérisé par un âge d'apparition de la fissuration plus précoce. Le risque de fissuration est aussi plus élevé lorsque la stabilité du BAP ou du MBAPE n'est pas suffisante.

Plus généralement, ce comportement est relié au retrait de dessiccation légèrement plus élevé des BAP ou des MBE, dû principalement au volume de pâte supérieur qui augmente les niveaux de contrainte et réduit en moyenne l'âge de fissuration [83]. Toutefois il faut également tenir compte d'autres facteurs qui interagissent comme le module d'élasticité et la résistance en traction qui ne sont pas affectés de la même façon par le volume de pâte. La nature des adjuvants s'avère également déterminante. L'utilisation d'un superplastifiant haut réducteur d'eau de type polynaphtalène sulfonate, double l'âge de fissuration par rapport à un superplastifiant de type polycarboxylate [95]. Enfin, ces mêmes chercheurs ont mis en évidence le rôle du type de ciment (avec ajout de fumée de silice, cendres volantes, laitier, etc.) sur la résistance à la fissuration de retrait empêché, à même rapport E/C.

II.5. CONCLUSION

Cette partie a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives au comportement des MBAPE vis-à-vis du retrait à court et à long terme, libre et empêché. Au jeune âge il est très important pour sa durabilité qu'une cure soit pratiquée afin d'éviter une dessiccation précoce pouvant générer un retrait plastique mais aussi une hydratation incomplète [4]. A l'issue de l'étude bibliographique il apparaît un manque de compréhensions sur le comportement différé libre sur MBAPE frais et durci c'est pourquoi notre recherche contribuera à apporter quelques réponses. Il s'agira de réaliser une campagne expérimentale et de suivre l'évolution des déformations dues retrait total, retrait plastique, retrait endogène et de dessiccation, et de la fissuration due au retrait empêché ainsi que l'étude du comportement mécanique et ce sur des MBAPE à base de sédiments traités par calcination à 750°C pendant 5 heures. Ces derniers ayant des propriétés pouzzolaniques peuvent être utilisés en tant qu'ajouts ou substituts au ciment ce qui fait de la technologie des bétons ou des mortiers une voie privilégiée de leur valorisation.

Les études relatives à leur utilisation dans les MBAPE sont rares. Plus important encore, leur retrait à court et à long terme est encore peu étudié dans la littérature.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **ROZIÈRE E., GRANGER S., TURCRY P., LOUKILI A.**, «Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete». *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 8, pp. 626–636, Sep. 2007.
- [2] **SAMOUEH H.**, «Nouvelles approches des relations entre formulation et comportement diérré des matériaux cimentaires : application aux bétons autoplaçants». Ecole Centrale de Nantes, 2015. France.
- [3] **HOLT E.** «Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete». Technical Research Center of Finland ESPOO, VTT PUBLICATIONS, 446, 2001.
- [4] **TORRENTI J.M.**, «Comportement du béton au jeune âge». Analyse de quelques exemples, IFSTTAR, Département Matériaux et Structures
- [5] **SCHWARTZENTRUBER L., et TORRENTI J.**, «Le grand livre des bétons», Paris, Editions Le moniteur, (2014)
- [6] **WITTMANN F.H.**, «On the action of capillary pressure in fresh concrete». *Cem.Concr.Res.*,6(1), P.49-56. 1976
- [7] **RADOCEA A.**, «A model of plastic shrinkage», *Mag.Concr.Res.*,46(167),P.125-132. 1994.
- [8] **SLOWIK V., SCHMID M., FRITZSCH R.**, «Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value». *Cem.Concr.comp.*,30,P.557-565, 2008.
- [9] **TURCRY PH.**, «Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants Influence de la Formulation». L'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes, le 3 février 2004
- [10] **MBEMBA E.**, « Le comportement des bétons au très jeune âge », 12/05/2009
- [11] **SLOWIK V., SCHMIDT M., & FRITZSCH R.**, «Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value». Ed. Cement & Concrete composites, 2008.
- [12] **POWERS T.C.**, «The properties of fresh concrete». J. Wiley & Sons, Inc. pp533-362. New York, USA, 1968.

- [13] AMZIANE S., & ANDRIAMANANTSILAVO N., «Prediction of cement paste pore water pressure variations during setting period». Advances in Cement Research, January 2004
- [14] YURTDAS I., «Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux à matrice cimentaire», étude expérimentale sur mortiers.
- [15] TURCRY PH., and LOUKILI A., «Evaluation of Plastic Shrinkage Cracking of Self-Consolidating Concrete», ACI Materials Journal/July-August 2006
- [16] NIK NEZHAD D., «Contribution à l'étude du comportement mécanique, du retrait et des propriétés de transport des bétons autoplaçants avec additions minérales», approche numérique et expérimentale, 2015.
- [17] HAMMER T.A., «Test method for linear measurement of autogenous shrinkage before setting». Proceedings of the International workshop on autogenous shrinkage of concrete, Autoshrink 98, Rilem, 1998.
- [18] HAMMER T.A., «The relationship between settlement and plastic shrinkage of high-performance concrete». Proceedings of the Full ACI convention, Phoenix, USA, ACI, 2002
- [19] HAMMER T.A., «Cracking in high performance concrete before setting». Proceeding of the International symposium on high performance and reactive powder concrete, Sherbrook, P.C. Aïtcin(ed) 1998.
- [20] UNO P.J., «Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas». ACI Mat.J., 95 (4), P.365-375. 1998.
- [21] DIASW P.S., «Influence of mix and environment on plastic shrinkage cracking» Mag.Concr.Res., 55,385,P.394. 2003.
- [22] SOROUSHIAN P., RAVANBAKHS S., «Control of plastic shrinkage cracking with specialty cellulose fibres». ACI Materials Journal, vol.95, n°4, P.429-435, 1998.
- [23] BAYASI Z., MCLNTYRE M., «Application of fibrillated polypropylene fibers for restraint of plastic shrinkage cracking in silica fume concrete». ACI Materials Journal, 99 (4), pp. 337 – 344. 2002.
- [24] [ACI 99] «ACI Manual of Concrete Practice», Part 2, Construction practices and inspection pavements, ACI 305R-91, 1999.

- [25] **KRONLOF A., LEIVO M., SIPARI P.**, «Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cacking of fresh mortar». Cement and Concrete Research ,vol.25,n°8,P.1747-1754,1995.
- [26] **HAMMER T.A.**, «Cracking in high performance concrete before setting». Proceeding of the International Symposium on high performance and reactive powder concrete, Sherbrook ,Canada,1998.
- [27] **BJONTEGAARD O.**, «Thermal dilation and autogenous deformation as driving forces to self-induced stresses in high performance concrete», PhD thesis of the Norwegian University of Science and Technology, Trondheim,1999.
- [28] **FOURDINE E, GUIGOU C., CHAPPUIS J.**, «Early age shrinkage of mortars: conception of a new device and detailed analysis of a typical experimental curve». Proceeding of the International RILEM workshop,Shrinkage 2000, RILEM Publications,2000.
- [29] **HOLT E., LEIVO M.**, «Methods of reducing early -age shrinkage». Proceeding of the International RILEM workshop,Shrinkage 2000.
- [30] **HOLT E.**, « Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages». Cement and Concrete Research, 35 : 464-472. 2004.
- [31] **BERNARDINI C.**, «Les bétons autoplaçants». Presses Ponts et Chaussées, Paris, Août (2011).
- [32] **RADOCEA A.**, «Autogenous volume change of concrete at very early age». Magazine of concrete Research, 50(2) ,1998, P.107-133.
- [33] **LOUKILI A.**, «Les bétons- autoplaçants», Editions Lavoisier,Cachan, 23 Décembre, 2010
- [34] **VERNET C., et CADORET G.**, «Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des BHP pendant les premiers jours dans Les Bétons à Hautes Performances - Caractérisation, durabilité, applications». Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. (1992).
- [35] **MONGE J.**, «Fissuration des mortiers en couches minces - Effet de l'hydratation, du séchage et de la carbonatation». École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2007.

- [36] TAZAWA E-I., MIYAZAWA S., KASAI T., «Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste». Cement and Concrete Research. February 1995, Volume 25, Issue 2, Pages 288-292.
- [37] MOUNANGA P., KHELIDJ A., LOUKILI A., BAROGHEL-BOUNY V., «Predicting $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content and chemical shrinkage of hydrating cement pastes using analytical approach». Cement and Concrete Research. February 2004, Volume 34, Issue 2, Pages 255-265.
- [38] MOUNANGA P., KHELIDJ A., LOUKILI A., BAROGHEL-BOUNY V., «Erratum to “Predicting $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content and chemical shrinkage of hydrating cement pastes using analytical approach». [CCR 34 (2) (2004) 225-265]. Cement and Concrete Research. 2005, Volume 35, Pages 423-424.
- [39] BOUASKER M., MOUNANGA P., TURCY P., LOUKILI A., KHELIDJ A., «Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: effect of limestone filler and granular inclusions». Cement and Concrete. January 2008, Volume 30, Issue 1, Pages 13-22.
- [40] YSSORCHE M.P., «Microfissuration et durabilité des bétons à hautes performances». Thèse de Insa, Toulouse 1995.
- [41] BUIL M., «Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante». Thèse de l'ENPC 1979.
- [42] BENBOUDJEMA F., «Modélisation des Déformations Différées du Béton sous Sollicitations Biaxiales». Thèse de doctorat, Université Marne La Vallée, Paris, France, 2002.
- [43] HUA C., ACKER P., EHRLACHER A., « Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste: I. Modelling at macroscopic scale. » Cement and Concrete Research, 25(7), 1457-1468, 1995.
- [44] NEVILLE A.M., « Properties of concrete», Addison Wesley Longman Limited, Forth and final edition, Longman, ISBN 0-582-23070-5, 1995.
- [45] BJONTEGAARD O., « Thermal dilatation and autogenous deformation as driving forces to selfinduced stresses in high performance concrete », PhD thesis, Trondheim, Norway, 1999.

- [46] **ODLER I., COLAN-SUBAUSTE J.**, «Investigations on cement expansion associated with ettringite formation », *Cement and Concrete Research*, 29, pp 731735, 1999.
- [47] **JENSEN O.M.**, « Influence of cement composition on autogenous deformation and change of the relative humidity », *Proceedings of the International RILEM Workshop*, Edited by Baroghel -Bouny and P-C. Aïtcin, pp 143-153, 2000.
- [48] **BARCELO L., BOIVIN S., ACKER P., TOUPIN J., CLAVAUD B.**, « Early age shrinkage of concrete: back to physical phenomena », *Concrete Science and Engineering, RILEM*, Vol. 3, No. 10, pp 85-91, 2001.
- [49] **LOUKILI A.**, « Etude du retrait et fluage du bétons à ultra hautes performances », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, Nantes, 1996.
- [50] **BJONTEGAARD O., HAMMER T.A., SELLEVOLD E.**, « On the measurement of free deformation early age cement paste and concrete ». *Cement and Concrete Composites*, 26, pp 427- 435, 2004.
- [51] **VAN BREUGEL K.**, « Simulation of hydration and formation of structures in hardening cement pastes based materials», PhD thesis, Delft University of technology, 1991.
- [52] **STEFAN L.**, «Etude expérimentale et modélisation de l'évolution des propriétés mécaniques au jeune âge dans les matériaux cimentaires». Thèse de l'ENS Cachan et de l'Université de Laval, 2009.
- [53] **LOUKILI A., CHOPIN D., KHELIDJ A., LE TOUZO J.Y.**, «A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history». *Cement and Concrete Research*, Pages 915–922. 2000.
- [54] **BOIVIN P., ACKER S.R., CLAVAUD B.**, «Experimental Assessment of Chemical Shrinkage of Hydrating». *Cement Pastes. Autogenous Shrinkage of Concrete E&FN spon*, London, pages 3–68, 1999.
- [55] **MITANI H.**, «Variations volumiques des matrices cimentaires aux très jeunes âges : approches expérimentales des aspects physiques et microstructuraux». Thèses de doctorat de l'ENPC, 2003.

[56] **MOUNANGA P.**, « Comportement des matrices cimentaires au jeune âge : relation entre évolution chimique et déformations chimique et endogènes ». XXIème Rencontres Universitaires De Genie Civil 2003.

[57] **JAOUADI I .**, « Etude numérique et expérimentale du retrait endogène de la pâte de ciment au jeune âge». Thèse de doctorat .Ecole Polytechnique Fédérale De Lausanne. Suisse 2008.

[58] **BENKECHKACHE G.**, «Contribution à l'étude des mécanismes lies au retrait et fluage (déformations différées) des bétons». Université Mentouri Constantine, faculté des sciences de l'ingénieur département de génie civil, 2012.

[59] **BOULAY C.**, « Développement d'un dispositif de mesure du retrait endogène d'un béton au jeune âge ». Huitième édition des Journées Scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le béton (RF)2B, Montréal, Canada, 5-6 juillet 2008.

[60] **BOUASKER M.**, « Etude numérique et expérimentale du retrait endogène au très jeune âge des pates de ciment avec et sans inclusions »Thèse de Doctorat, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, Nantes, , France.2007

[61] **BENBOUDJEMA F., MEFTAH F., TORRENTI J.M.**, « Interaction between drying, shrinkage, creep and cracking phenomena in concrete », Engineering Structures, vol. 27, p.239–250, 2005.

[62] **REVIRON N.**, «Etude du fluage des bétons en traction. Application aux enceintes de confinement des centrales nucléaires à eau sous pression ». Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure De Cachan, Mars .2009.

[63] **PONS G.**, « Caractérisation du comportement différé des bétons : de la réalité à la note de calculs ». Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées ; Spécial XX ; pp 91-71 ; 1998.

[64] **OLLIVIER J.P., VICHOT A.**, « La durabilité des bétons. Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement ». Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 2008.

[65] **LE ROY R.**, «Déformations instantanées et différées des bétons de hautes performances». Thèse de L'ENPC, Paris 1995.

- [66] **ACKER P.**, «Comportement mécanique du béton : apports de l'approche physico-chimique». Rapport de recherche LCPC, n°152. 1988.
- [67] **BAZANT Z.P.**, «Mathematical models for creep and shrinkage in concrete», in Creep and shrinkage in concrete structures Z.P. Bazant et F.H. Wittmann, eds, Wiley & Sons. 1982.
- [68] **GRANGER L., TORRENTI J.M., ACKER P.**, «Thoughts about drying shrinkage: experimental results and quantification of structural drying creep». Mat. struct., December 1997.
- [69] **VERBECK G.J.**, «Carbonation of hydrated Portland cement». ASTM. SP. Tech. Publ. 1958, 205, Pages 17-36.
- [70] **GNON H.**, «Influence des variations thermo-hydro-mécaniques sur le comportement différé du béton». Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2015.
- [71] **HOUST Y.F.**, «Carbonation Shrinkage of Hydrate Cements Paste». CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Ottawa, Canada, July 1, 1997.
- [72] **OGAWA A., SAKATA K., TANAKA S.**, «A study on reducing shrinkage of high-flowable concrete». 2nd international symposium of CANMET/ACI.P. 55-72. LasVega, ETATS-UNIS, 1995.
- [73] **ROLS S., AMBROISE J., PERA J.**, «Development of an admixture for Self-leveling concrete». Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on Superplastifiant and the chemical admixtures in concrete. P493-509. V.M. Malbotra Rome, Italie. (1997).
- [74] **TANAKA K., SATO K., WATANABE S., ARINA I., SUENAGA K.**, «Development and utilization of high performance concrete for the construction of the Akashi Kaikyo Bridge». International Symposium on high Performance Concrete in Science Environments.P25-51. SP 140ACI, Detroit, Etats-Unis. (1993).
- [75] **PERSSON B.**, «A comparison between mechanical properties of Self-Compacting Concrete and the corresponding properties of normal Concrete». Cement and Concrete Research.vol.31(2). p.193-198, (2001).
- [76] **FERNANDEZ-GOMEZ J., LANDSBERGER G.A.**, «Evaluation of shrinkage prediction models for self-consolidating concrete». Vol 104 n°5. P.464-473. (2007).

- [77] **ROZIERE E., GRANGER S., TURCRY P., LOUKILI A.**, «Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of Self-Compacting concrete». *Cement and Concrete Composites*.vol29(8), P26-636, (2007).
- [78] **PERSSON B.**, «Creep of Self –compacting » *CONCREET Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and concrete structures*.P. 535-540.Nantes,2005.
- [79] **MAZZOTTI C., SAVOLA M., CECCOLI C.**, «A comparison between long term proprieties of self -compacting concretes and normal vibrated concretes with same strength» *CONCREET7 Creep, Shrinkage and durability of concrete and concrete structures*.P. 523-528.ISTE. Londres,2005
- [80] **HEIRMAN G., VANDEWALLE L., VAN-GEMERT D., BOUEL V., AUDENAERT K., DE-SCHUTTER G., DESMET B., VANTOMME J.**, « Time dependent deformations of limestone powder self- compacting concrete». *Engineering Structures*.vol 30(10). p.2945-2956,2008
- [81] **CHOPIN D., FRANCY O., LEBOURGEOIS S., ROUGEAU P.**, «Creep and shrinkage of heated-cured Self compacting concrete (SCC)». 3rd international RILEM Symposium Self- COMPACTING CONCRETE.P.672-683, Reykjavik, Island, 2003.
- [82] **ROZIÈRE E., GRANGER S., TURCRY P., LOUKILI A.**, «Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self -compacting concrete». *Cement and concrete composites*, vol.29(8), P.26-636. 2007.
- [83] **STAQUET S., BOULAY C., D'ALOIA L., TOUTLEMONDE F.**, «Autogenous shrinkage of a self-compacting VHPC in isothermal and realistic temperature conditions». 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering. Québec. Canada.2006.
- [84] **HEIRMAN G., VANDEWALLE L.**, «The influence of fillers on the properties of Self-Compacting Concrete in fresh and hardened state». 3rd International RILEM Symposium Self Compacting Concrete p, 606-618, Reykjavik. Islande, 2003.
- [85] **KLUG Y., HOLSCHEMACHER K.**, «Comparison of the hardened properties of Self-COMPACTING and normal vibrated concrete». 3rd International RILEM Symposium Self Compacting Concrete p, 596-605, Reykjavik. Islande, 2003.

- [86] **HAOUAS A.**, « Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires caractérisation et modélisation chimio hydro mécanique du retrait ». Ecole normale supérieure de Cachan, France,2007
- [87] **ØBJØNTEGAARD** «Thermal Dilation and Autogenous Defamation as Driving forces to Self-induced stresses in High Performance Concrete». Thèse de doctorat, NTNU division of Structural Engineering. Trondheim, Norway, 1999
- [88]**KHAJURI A., and BALABURU P.**, «Plastic shrinkage Characteristics of Fiber Reinforced Cement Composites». Proceeding of 4th RILEM International Symposium, Pages 82-90,1992.
- [89] **BANTHIA N., YAN C., and MINDESS S.**, «Restrained Shrinkage Cracking in Fiber Reinforced Concrete -a Novel Test Technique». Cement and Concrete Research, 26[1],1996.
- [90] **WEISS W.J., YANG W., AND SHAH S.P.**, «Shrinkage Cracking of Restrained Concrete Slabs». ASCE Journal of Engineering Mechanics, 124 [7]: 765-774, 1998.
- [91] **PAILLERE M., BUIL M., SERRANO J.J.**, « Effect of fiber addition on autogenous shrinkage of silica fume concrete». ACI Materials Journal, 86[2] :139–150, 1989.
- [92] **BLOOM R., BENTUR A.**, «Free and restrained shrinkage of normal and high-strength concretes». ACI Materials Journals, 92[2] :211–217, 1995.
- [93] **ALTOUBAT S.A., LANGE D.A.**, «A new look at tensile creep of fiber reinforced concrete». ACI Special Publication on Fiber Reinforced Concrete Ed. N. Banthia, 2003.
- [94] **HWANG S.D., KHAYAT K.H.**, «Effect of mix design on restrained shrinkage of self-consolidating concrete Materials and Structures»,vol 43,P.367-380.2010.
- [95] **ASTM C.**, «Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage» 1581-04, 2005.
- [96] **LOSER R., LEEMANN A.**, «Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete Materials and Structures», vol. 42, P.71-82,2009.

CHAPITRE III.

LES PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT

CHAPITRE III. LES PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présenterons en premier lieu la structure poreuse des matériaux cimentaires. Deuxièmement, nous parlons de l'absorption capillaire qui est une grandeur physique qui permette de caractériser l'aptitude des matériaux cimentaires à résister à l'intrusion des agents agressifs. Nous présenterons la relation entre l'absorption capillaire aux caractéristiques poreuses des matériaux. Nous exposerons aussi des études sur les effets des additions minérales sur la porosité et l'absorption capillaire.

III.2. POROSITÉ ET PROPRIÉTÉS DU RÉSEAU POREUX

La porosité est un indicateur de la qualité du matériau cimentaire car elle permet de déceler les défauts de mise en œuvre pouvant être en lien avec la consistance (matériau cimentaire ferme ou visqueux), et les écarts ponctuels de composition. Elle constitue aussi un indicateur de durabilité car elle intervient dans la plupart des mécanismes de dégradation. Cependant, les propriétés du réseau poreux sont au moins aussi influentes que la porosité totale : connectivité, tortuosité, distribution de la taille des pores [1].

III.2.1. Description de la structure poreuse d'un matériau

Le béton ou le mortier est un matériau polyphasique. Il est composé d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse. Le solide est constitué des granulats, des hydrates et des parties du liant non hydratées. La phase liquide est la solution interstitielle et la phase gazeuse est un mélange d'air et de vapeur d'eau [2]. Schématiquement, le matériau poreux, peut être représenté selon la figure III.1.

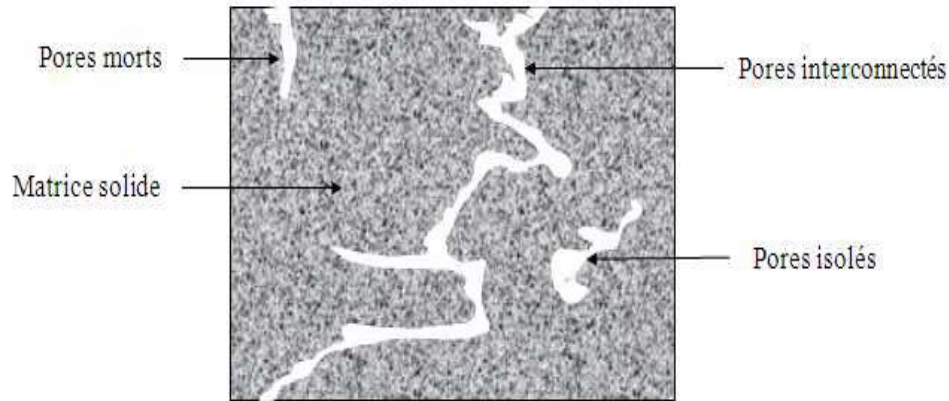


Figure III.1. Description schématique d'un matériau poreux [3]

La porosité est définie par le rapport entre le volume de pores (V_p) et le volume total (V_t) de matériau.

D'après la figure III.1, on constate trois groupes de pores :

- **Les pores interconnectés** qui forment un espace continu dans le milieu poreux et participent au transport de matière à travers le matériau.
- **Les pores aveugles ou bras morts** qui sont connectés uniquement par une voie. Ils peuvent donc être accessibles à un fluide extérieur mais ne participent pas au transport.
- **Les pores isolés** qui ne communiquent pas avec le milieu extérieur. On définit aussi l'indice des vides par le rapport du volume des vides (V_{vide}) sur le volume de solide (V_s) [3].

L'état d'humidité du matériau peut être caractérisé par deux grandeurs :

- **La teneur en eau**, $W = m_e / m_s$, où m_e est la masse d'eau liquide contenue dans le béton et m_s la masse du béton sec.
- **Le degré de saturation**, $S = V_e / V_o$, où V_e est le volume d'eau contenu dans les vides ouverts et V_o le volume des pores « ouverts », c'est à dire communiquant avec l'extérieur [2].

Pour caractériser la géométrie d'un réseau poreux d'un matériau on utilise aussi trois notions :

- **La tortuosité T**, définie par Carman [4] comme le carré du rapport entre la longueur moyenne de l'écoulement dans le milieu poreux L_e à la longueur du matériau mesurée dans la direction macroscopique de l'écoulement L .
- **La constrictivité δ** est un paramètre qui rend compte de façon qualitative de la variation de section qu'offrent les pores à l'écoulement ($\delta < 1$) [5].
- **Le facteur de formation F** [6] défini selon la relation $F = \sigma / \sigma_e$ où σ est la conductivité électrique de la solution interstitielle contenue dans le milieu poreux et σ_e la conductivité électrique du même milieu poreux saturé par cette solution.

Les grandeurs que nous venons de définir permettent de caractériser globalement (macroscopiquement) un matériau poreux. Les propriétés de transfert des matériaux (l'absorption capillaire, perméabilité) dépendent de la porosité mais elles sont aussi influencées par la taille des pores et leur connexion [2].

III.2.2. Les méthodes de caractérisation de la structure poreuse des matériaux

La structure poreuse des bétons ou des mortiers est complexe et les méthodes de caractérisation sont nombreuses.

- **La porosité accessible à l'eau** est la méthode de mesure la plus utilisée qui consiste à saturer le matériau sous vide. Le volume apparent est déterminé au moyen d'une pesée hydrostatique et le volume des vides est obtenu par différence entre la masse de l'échantillon saturé et celle mesurée après séchage.
- **Les isothermes de sorption d'eau**. Elle suppose qu'il y a coexistence d'eau liquide condensée dans les pores et d'eau adsorbée sur les parois des pores.

La distribution de la taille des pores est obtenue à partir de courbe de désorption en faisant l'hypothèse que les pores sont cylindriques, que le rayon des pores remplis d'eau est donné par la relation de Kelvin-Laplace et que les pores sont recouverts d'une couche d'eau dont l'épaisseur varie avec l'humidité relative. Cette méthode est particulièrement utilisée pour caractériser les pores dont le rayon est de l'ordre de la dizaine de nm [2].

- **L'analyse d'images.** Des images numériques de sections polies de béton obtenues généralement en microscopie électronique à balayage sont analysées. La porosité est par contre une grandeur facile à connaître puisqu'elle est égale à la fraction surfacique des vides observée sur une coupe. En pratique cette méthode est peu adaptée à l'étude de la structure poreuse des matériaux car elle nécessite des quantités d'images considérables pour disposer d'une représentation significative. L'analyse d'image peut toutefois fournir des informations utiles si on limite l'investigation aux pores les plus gros [2].
- **La porosimétrie au mercure.** Un échantillon préalablement séché est soumis à des pressions croissantes de mercure. Ce liquide non mouillant pénètre progressivement dans le matériau [2].

III.2.3. Structure poreuse de la pâte de ciment

La microstructure poreuse d'une pâte de ciment peut être classiquement décrite en distinguant deux familles de pores (distribution bimodale) comme le montre la figure III.2.

1. **Les pores capillaires** (les plus gros). Ce sont les vestiges, à un moment donné de l'hydratation, des espaces intergranulaires de la pâte initialement emplie d'eau,
2. **Les pores des hydrates** (les plus petits). Ils se forment à l'intérieur des hydrates.

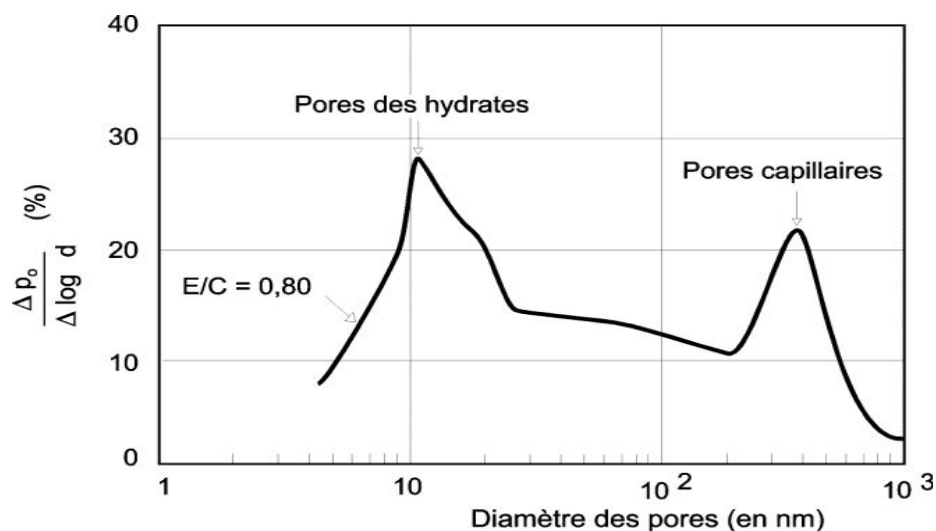


Figure III.2. Mise en évidence, par porosimétrie mercure, des pores capillaires et des pores des hydrates, d'après [7]

Les pores de plus grande taille (environ $0,5 \mu\text{m}$) sont les vestiges des espaces granulaires et les pores les plus petits (environ 10 nm) constituent la microporosité des hydrates. Les courbes de fréquence porosimétrique permettent de visualiser la répartition en volume des pores d'un matériau poreux.

III.2.4. Influence de la composition

Les principaux facteurs qui affectent la porosité de la pâte de ciment hydraté sont le rapport eau/ciment et la quantité d'air piégé durant le malaxage. Des études effectuées par Hamami [8] sur l'effet du rapport E/C sur la distribution des tailles des pores dans les pâtes de ciment (A6-100, A4-100, B6-100 et B4-100) et dans les mortiers (A6-50, A4-50, B6-50 et B4-50). Les résultats sont représentés sur les figures III.3.a et III.3.b, on constate que les matériaux ayant un rapport E/C=0,4 ont un mode principal de pores plus petit que les pâtes à E/C=0,6 et présentent un plus petit volume de pores, ceci leur donne une plus petite porosité totale.

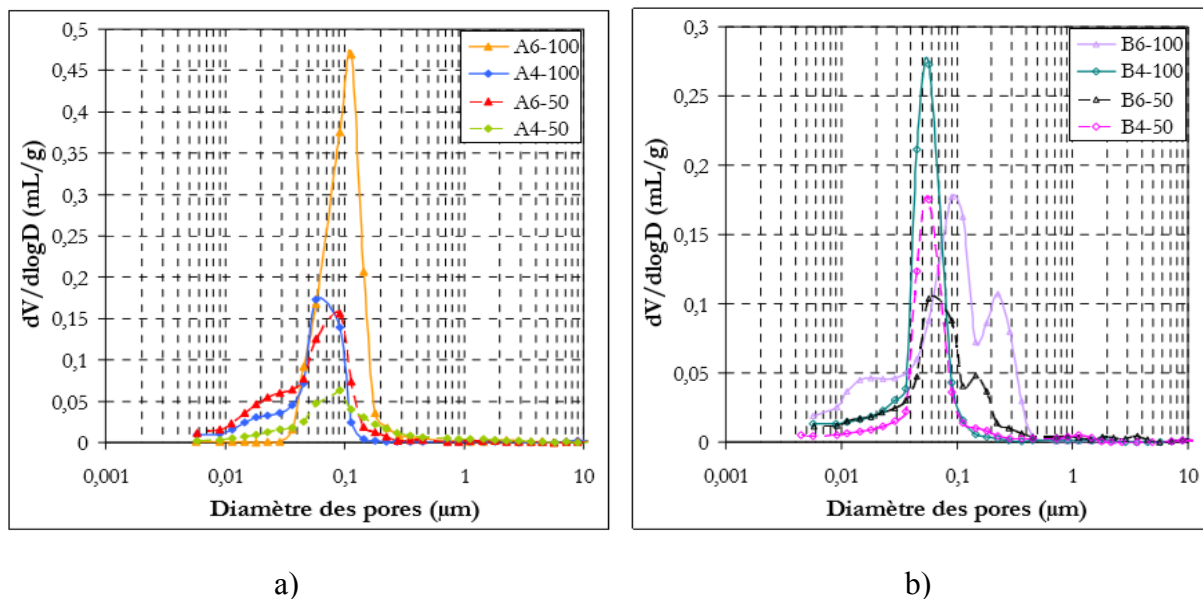


Figure III.3. Effet du dosage en eau sur la distribution de la taille des pores des pâtes de ciment et mortiers : a) sans addition et superplastifiant b) avec addition et superplastifiant [8]

L'influence du rapport $E_{\text{eff}}/\text{Liant}$ eq sur la porosité est prépondérante (figure III.4). Le surcroît de porosité des BAP s'expliquerait par les différences au niveau de l'eau efficace, la constante de l'étude étant la teneur en ciment [9].

En faisant l'hypothèse que toute la porosité accessible à l'eau dans le béton est la porosité de la pâte.

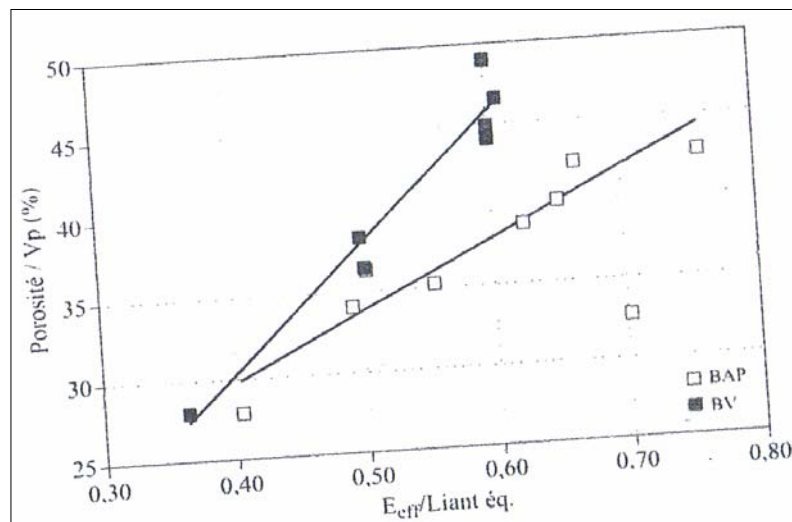


Figure III.4. Évolution de la porosité de la pâte en fonction du rapport $E_{eff}/liant_{éq}$ [9].

Si l'influence du rapport $E_{eff}/L_{éq}$ est bien toujours observée, il apparaît également que la porosité de la pâte est plus faible pour les BAP (figure III.4). Ceci peut être dû aux teneurs en air occlus plus faibles des BAP, en relation avec leur consistance plus fluide [1].

III.2.5. Influence des additions minérales

- *Influence des cendres volantes et vase calcinée*

Des résultats d'études effectuées sur des pâtes contenant des cendres volantes montrent (figure III.5) que celles-ci entraînent un accroissement de la porosité et de la taille des pores aux premiers âges consécutif à une quantité d'hydrates plus faible. La réactivité des cendres volantes qui se développe après quelques semaines, vient renforcer les effets de l'hydratation du clinker et conduit à long terme à une porosité du même ordre de grandeur et à une diminution de la taille des plus gros pores. Ces résultats dépendent fortement de la réactivité des cendres volantes, de la durée de la cure et de la température [2].

La pouzzolanité ou l'hydraulicité des cendres volantes peuvent réduire la porosité à long terme si le matériau est conservé humide [2].

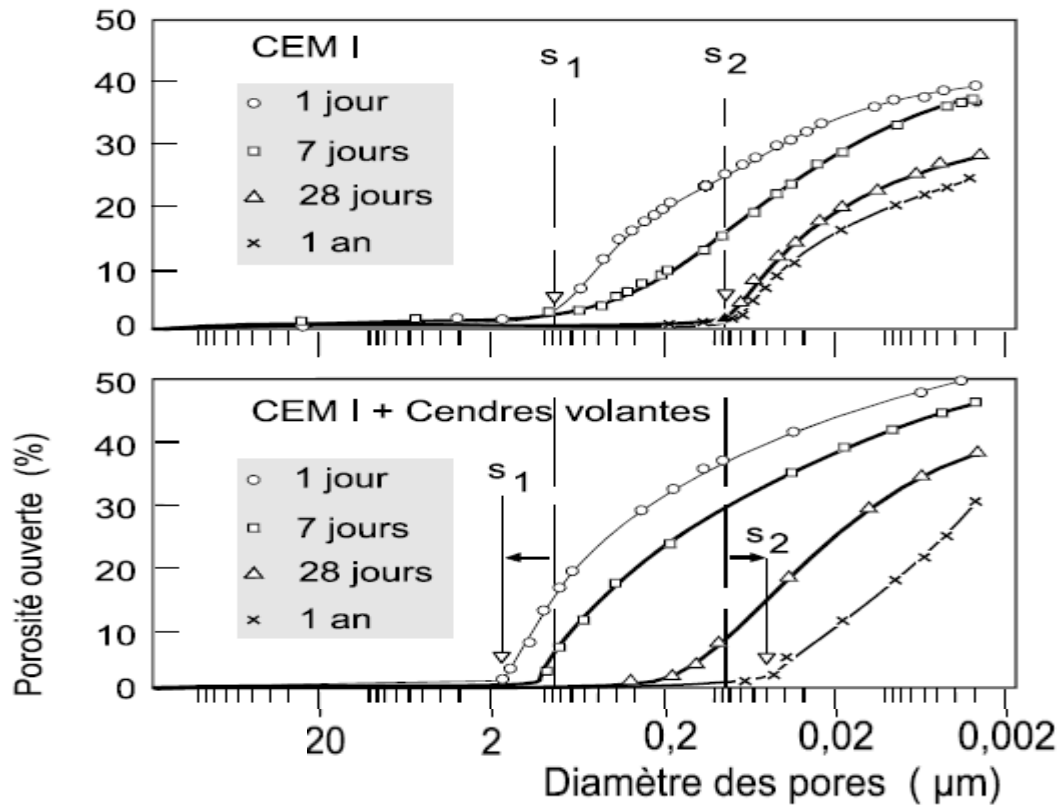


Figure III.5. Influence de l'addition de cendres volantes sur l'évolution de la structure porosimétrique des pâtes de ciment au cours du temps [10].

Safer [11] a étudié la porosité totale de quatre bétons ordinaires de même rapport $E/L=0.5$, à base de CEMI (BOT de référence) et de vase calcinée (BOV 10%, BOV 20% et BOV 30%). À court terme (jusqu'à 28 jours), les résultats ont montré que la porosité totale est plus faible pour les bétons contenant la vase par rapport au béton témoin. Cela est dû peut-être aux bulles d'air et des granulats ($D_{max} > 15$ mm) qui ont une influence notable sur sa porosité (figure III.6).

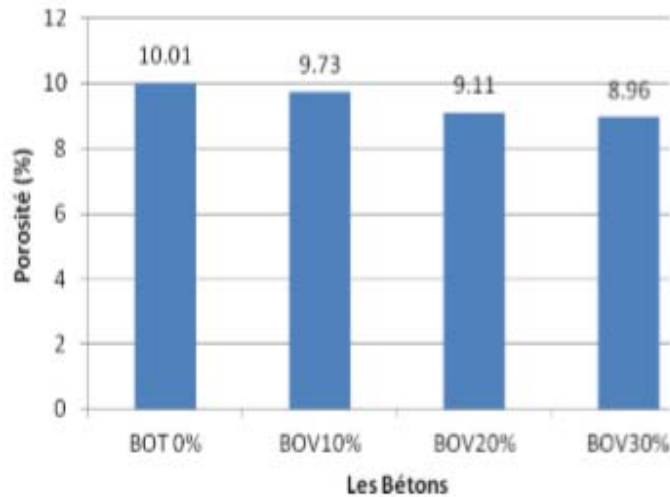


Figure III.6. Influence de l'addition de la vase calcinée sur l'évolution de la porosité accessible à l'eau des différents bétons vibrés à 28 jours de conservation [11]

Belguesmia [12] a étudié la porosité totale de quatre BAP de même rapport E/L, à base de CEMI (BAP de référence) et de vase calcinée (10%, 20% et 30%). Au moyen terme (jusqu'à 90 jours), la porosité totale est plus faible pour le BAP de référence (figure III.7).

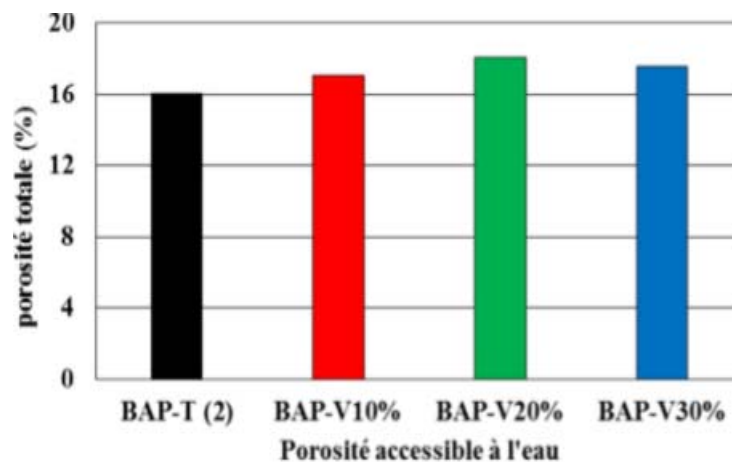


Figure III.7. Influence de l'addition de la vase calcinée sur la porosité totale des BAP à 90 jours de conservation [12]

III.2.6. Propriétés du réseau poreux

Deux bétons de même porosité globale peuvent présenter des comportements et donc des durabilités différentes. Comme vu précédemment, ces différences peuvent provenir du volume de pâte et de la porosité effective de la pâte.

Les différences de comportements s'expliquent aussi par les propriétés du réseau poreux connecté, c'est-à-dire le volume poreux accessible aux agents agressifs en phase aqueuse ou gazeuse, et l'évolution de ces propriétés au cours du temps, car l'exposition aux agents agressifs est souvent précoce et le comportement à long terme influencé par les propriétés au jeune âge [1]. Malgré certaines limites, la porosimétrie par intrusion de mercure est un outil intéressant pour étudier l'évolution de la distribution poreuse en fonction du temps [1].

Les porosités mesurées par intrusion au mercure lors des travaux de Cook et col [13] ou encore Pandey et col [14], donnent des porosités globales plus importantes pour les pâtes mûres contenant des cendres, que les pâtes à base de ciment ordinaire. Ceci serait dû à la multiplicité de petits pores : avec 20% de cendres volantes la plupart des pores ont un rayon inférieur à 25nm, mesurables que sous d'importantes pressions d'intrusion de mercure. Parallèlement, les mesures réalisées aux très jeunes âges révèlent de grandes variations dans les distributions de tailles de pores, surtout pendant les 28 premiers jours quand intervient la segmentation capillaire des pores de plus gros diamètres.

Contrairement aux travaux de Belguesmia et al [15], les porosités mesurées par intrusion au mercure, donnent des porosités globales moins importantes pour les BAP contenant 20% et 30% des sédiments traités que le BAP à base de CEMI (figure III.8). Cela pourrait être expliqué par le fort dosage en superplastifiant dans les BAP à base de sédiment. En ajoutant du superplastifiant dans une pâte de ciment, la quantité de pores de gel contenus dans le matériau est réduite [16].

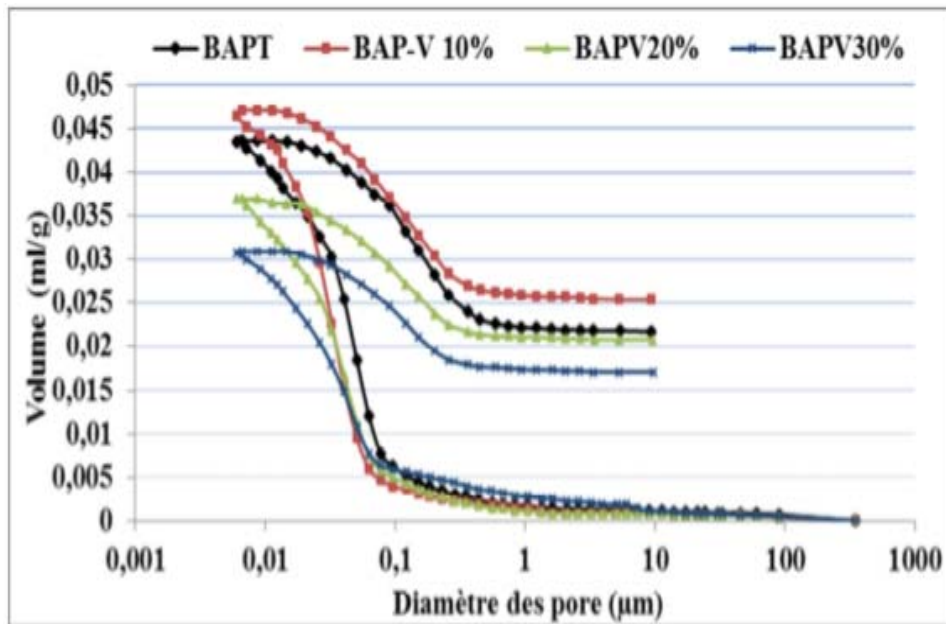


Figure III.8. Volume cumulé des pores des BAP à base de vase calcinée [15]

III.3. PHÉNOMÈNES DE TRANSFERT

III.3.1. Absorption capillaire

L'absorption d'eau par capillarité désigne le mécanisme de transport des liquides dans le milieu poreux dû aux tensions de surface dans les capillaires. Elle ne dépend pas que du réseau poreux, mais aussi du taux de saturation du béton [17].

L'absorption d'eau dans le béton sec est représentée à partir de deux paramètres principaux : la masse d'eau nécessaire pour saturer complètement le matériau (la porosité), la vitesse d'absorption par remontée capillaire ou absorptivité (notée S) [18].

Le comportement des bétons soumis à des essais d'imbibition peut ainsi être décrit par l'équation suivante :

$$A(t) = C + St^{1/2} \quad \text{III. 1}$$

Où $A(t)$ est le coefficient d'absorption capillaire à une échéance donnée de l'essai, en kg par m^2 de surface exposée à l'imbibition [1].

III.3.1.1 Influence des additions minérales (cendres volantes et vase calcinée)

L'absorptivité est influencée par le type d'ajout minéral utilisé dans les compositions des bétons.

Turk et al [19] ont étudié l'absorption capillaire d'un BAP à base de cendre volante (SCC1), un BAP à base de fumée de silice (SCC2) et un BOV (PC) en fonction de différents types de cure (dans l'eau, échantillons sciés et à l'air). Le BAP avec de la fumée de silice présente des coefficients d'absorption très faibles par rapport à celui contenant de la cendre volante et l'absorption de ce dernier est inférieure à celle du BOV. Une valeur élevée de l'absorption capillaire a été enregistrée dans le cas d'une conservation à l'air et plus faible dans le cas d'une conservation dans l'eau (figure III.9).

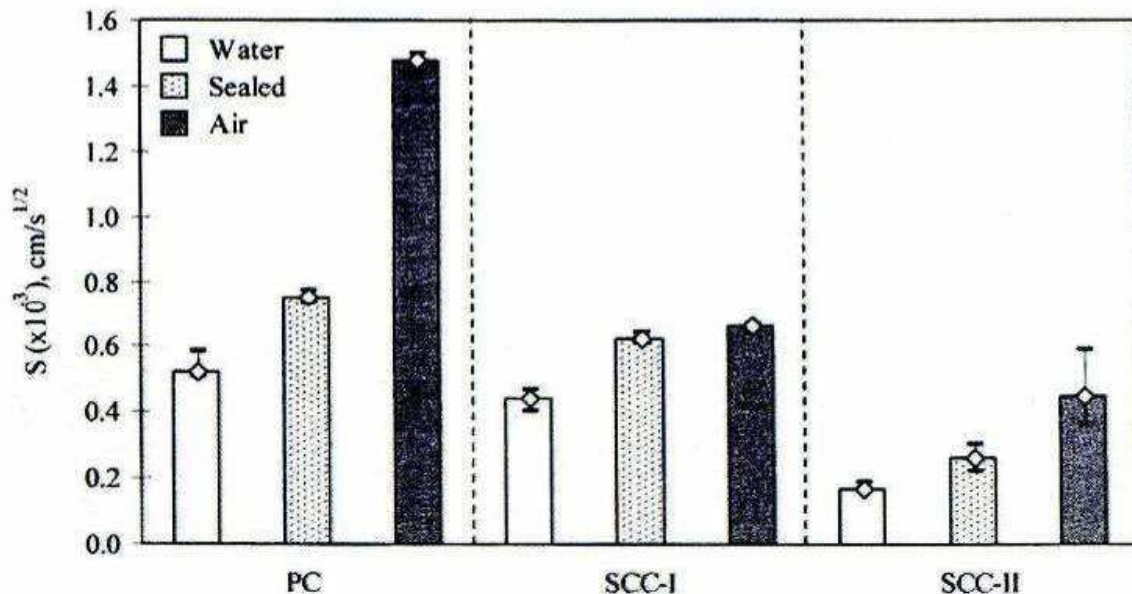


Figure III.9. Valeurs de sorptivité dans les différents milieux de conservation [19]

Les résultats de Zhu et al. [20] montrent que l'absorption capillaire des BAP à base de filler calcaire (SCC1) est inférieure à celle des BOV (figure III.10) (REF1 et REF2) et elle est d'autant plus faible qu'ils contiennent des cendres volantes (SCC2).

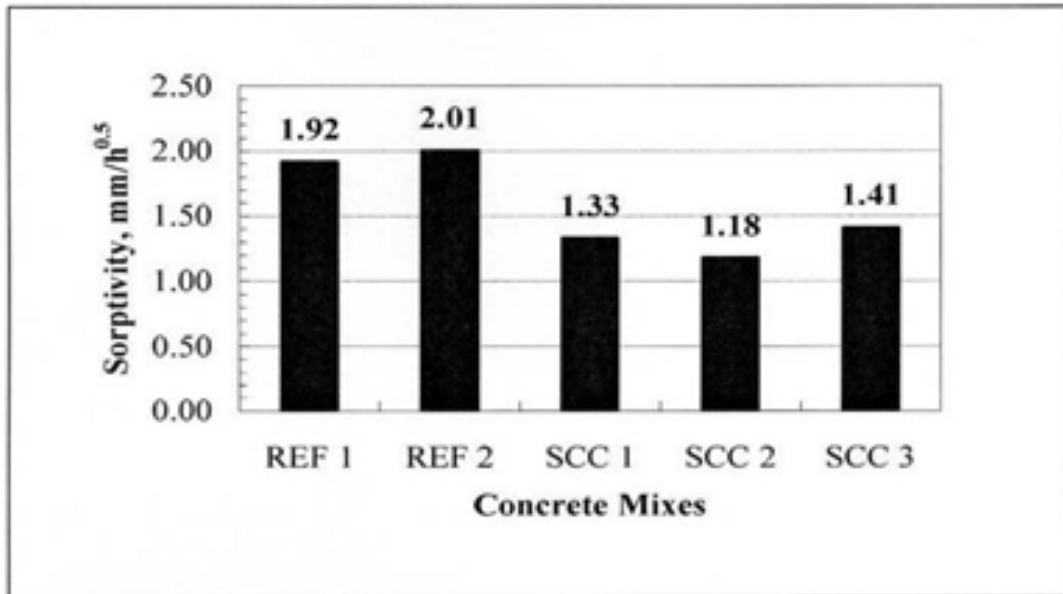


Figure III.10. Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés (REF) [20]

Boel et al. [21] rapportent des résultats similaires sur l'effet bénéfique de la cendre volante par rapport au filler calcaire sur l'absorption capillaire et la sorptivité des BAP.

L'étude faite par Audenaert et De Schutter [22] sur plusieurs BAP composés de filler siliceux, de filler calcaire et de cendre volante, montrent que les BAP contenant la cendre volante présentent les coefficients de l'absorptivité légèrement plus faible qu'aux deux premiers BAP.

Safer [11] a étudié l'effet de l'addition du sédiment issu du barrage de Chorfa II (ouest algérien) et traité par calcination à 750°C (à des taux de 10%, 20% et 30%) sur la sorptivité des bétons vibrés. Il a constaté que les bétons à base de vase calcinée ont donné des valeurs de sorptivité plus basses, comparées au béton de référence (figure III.11). Il a trouvé que la sorptivité du béton contenant la vase calcinée a varié de 0.78, 0.64 à 0.57 mm/h^{0.5} avec l'augmentation du niveau de substitution de cette vase de 10%, 20% à 30%, alors que le béton contenant le ciment sans vase a présenté une sorptivité de 0.83 mm/h^{0.5}.

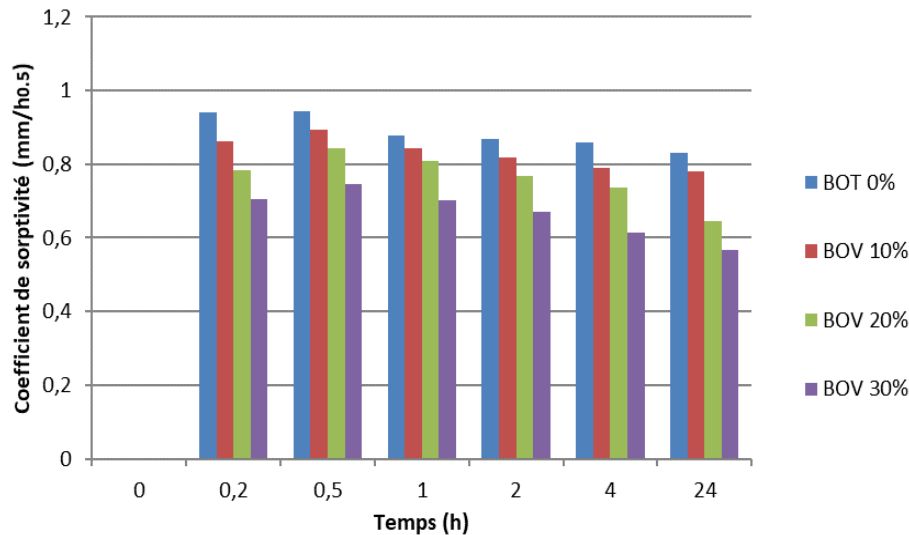


Figure III.11. Coefficients de sorptivité des différents bétons contenant de vase, essai réalisé après 28 jours de conservation [11].

III.4. CONCLUSION

Les propriétés de transfert sont définies par les structures des pores de la pâte et le volume de la pâte. À travers les études menées sur la porosité et l'absorption capillaire de différents bétons, mortiers et pâtes de ciment, nous avons constaté qu'il existe une relation entre le type d'addition minérale utilisée dans la pâte de ciment et les propriétés de transfert. Cependant, les faibles proportions des additions minérales utilisées dans ses travaux ne permettent pas de tirer des conclusions pertinentes sur ces propriétés. En effet, les mortiers autoplaçants qui possèdent un volume élevé de pâte et d'addition minérale semblent plus influencés par le type et la quantité des ajouts.

Les travaux publiés concernant l'effet du type d'addition minérale sur les propriétés de transfert des MBAPE sont peu nombreux en comparaison avec les performances mécaniques. On déduit clairement qu'un besoin en recherche est nécessaire dans l'étude de l'effet de la nature et des proportions des additions minérales sur les propriétés de transfert des MBAPE.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] LOUKILI A., «Les bétons autoplaçants», éditions Lavoisier, Cachan, 23 December 2010.
- [2] OLLIVIER J.P., TORRENTI J.M., «La structure poreuse des bétons et les propriétés de transfert». Chapter 3, January 2008.
- [3] NIK NEZHAD D., «Contribution à l'étude du comportement mécanique, du retrait et des propriétés de transport des bétons autoplaçants avec additions minérales», approche numérique et expérimentale, 2015.
- [4] CARMAN P.C., «Trans. Inst. Chem. ». Eng. 1935, London, 15, 150.
- [5] VAN BRAKEL J., HEERTHES P.M., «Analysis of diffusion in macroporous media in terms of porosity, a tortuosity and a constrictivity factor». Journal of Heat Mass Transfer, 1974, 17, 1093-1103.
- [6] DULLIEN F., «Porous Media - Fluid Transport and Pore Structure». New York, Academic Press 1979.
- [7] VERBECK G.J., HELMUTH R.H., «Structures and physical properties of hardened cement paste», 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968, 3, 7-1, 1-11.
- [8] HAMAM A.E., «Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires».Thèse de doctorat, Université de La Rochelle – UFR Science, 2009.
- [9] ASSIE S., «Durabilité des bétons autoplaçants». Thèse de doctorat, INSA
- [10] FELDMAN R.F., «Significance of porosity measurements on blended cement performance, in: 1st Intern». Conf. on the use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete, Montebello, 1983, V.M. Malhotra, Ed., ACI, SP-79, 1, 415-433.
- [11] SAFER O., « Optimisation de la formulation d'un éco-béton à base de sédiments de dragage et étude de sa résistance aux attaques chimiques ». Thèse de doctorat, Université des sciences et de technologie, Mostaganem, 29/10/2017.
- [12] BELGUESMIA K., «Optimisation d'un éco-BAP à base de sédiment de dragage vis-à-vis des états frais, durci et de la durabilité». Thèse de doctorat, Université des sciences et de technologie, Mostaganem, 01 Juillet , 2018.

- [13] **COOK D.J., CAO H.T., COAN E.P.**, «Pore structure development in Portland/fly ash blends», Materials Research Society, Symposia proceedings: Microstructural development during hydration cement, Ed. Struble L.J., Brown P.W., USA, 85, p. 201-213, 1987.
- [14] **PANDEY S.P., SHARMA R.L.**, «The influence of mineral additives on the strength and porosity of OPC mortar». Cement and Concrete Research, 30, p. 19-23, 2000.
- [15] **BELGUESMIA K., BELAS BELARIBI N., AMIRI O., LEKLOU N., BELARIBI O.**, «Influence of treated sediment substitution percentage on workability», strength and porosity of SCC. J. Mater. Eng. Struc. 5, 47–55, 2018.
- [16] **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.
- [17] **BASHEER L., KROPP J., CLELAND D.J.**, «Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review» Construction and Building Materials, vol .15, p.93-103, 2001.
- [18] **SIAD H.**, «Influence du type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants». Thèse de doctorat, Université de 2010
- [19] **TURK K., CALISKAN S., YAZICIOGLU S.**, «Capillary water absorption of self-compacting concrete under different curing condition». Indian journal of engineering and materials sciences. Vol 14 (2007). Pp. 365-372.
- [20] **ZHU W., QUINN J., BARTOS P.J.M.**, «Transport properties and durability of self-compacting concrete». Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 451-458, 23-25 Octobre 2001.
- [21] **BOEL V., AUDENAERT K., DE SCHUTTER G.**, «Modeling of gaz permeability in self-compacting concrete». 5th international Essen workshop, 11-12 Juin 2007, Essen, Germany, proceeding of 5th international Essen workshop, transport in concrete Nano-to macrostructure. E.D. M.J Setzer.
- [22] **AUDENAERT K., DESCHUTTER G.**, «Water permeability of self-compacting concrete». In Proceeding of advance in concrete through science and engineering. Evanston, 2004, CDROM, RILEM durability.

CHAPITRE IV.

LES SÉDIMENTS DE DRAGAGE DES BARRAGES

CHAPITRE IV. LES SÉDIMENTS DE DRAGAGE DES BARRAGES

IV.1 INTRODUCTION

Les sédiments sont un ensemble d'éléments déposés par l'eau, le vent, la glace qui proviennent de l'usure des continents, c'est à dire de la destruction de roches ou d'être vivants. La destruction se fait par des mécanismes physiques produisant la fragmentation des matériaux et des réactions chimiques donnant des solutions de lessivage (altération chimique). Les éléments solides sont déplacés sous l'effet de la gravité, souvent par l'intermédiaire d'un fluide transporteur (eau, glace), et sous l'effet des variations de pression atmosphérique qui produisent les vents. Les éléments en solution sont transportés par l'eau [1].

Le dépôt de particules solides minérales et organiques sur le lit du cours d'eau par érosion est à l'origine du phénomène d'envasement des barrages en particulier ceux implantés en Algérie. En effet, l'envasement des retenues de barrages a pris une ampleur importante, limitant ainsi leur capacité (diminution importante du volume d'eau stockée) [2].

Le dévasement est un moyen de lutte contre l'envasement néanmoins les conséquences engendrées sont le dépôt sédimentaire et les problèmes liés à son stockage [2]. Afin de répondre aux demandes importantes de matériaux pour la mise en place des nouveaux matériaux cimentaires, il devient nécessaire de trouver des sources de matériaux de remplacement, tels que les sédiments de dragage des barrages.

Dans ce chapitre, sont décrits les sédiments, le phénomène d'envasement des barrages en l'occurrence celui de Chorfa II situé dans la Daïra de Sig, ainsi que la valorisation des sédiments issus des opérations de dragage des barrages dans le domaine de génie civil.

IV.2. ORIGINE ET NATURE DES SÉDIMENTS

Les sédiments proviennent du dépôt des particules en suspension dans l'eau dérivant elles-mêmes de l'érosion des roches et des sols, de matériaux détritiques organiques et de la floculation d'éléments colloïdaux [2].

Les sédiments peuvent donc être d'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 ;
- ❖ **Exogène** : il s'agit des particules issues du ruissellement des eaux ou bien transportées par les vents ;
- ❖ **Naturelles ou anthropiques** : elles proviennent de l'érosion des sols, de la décomposition de matière végétale, de l'apport de matière en suspension, de matières organiques, de nutriments ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques [3].

IV.3. COMPOSITION DES SÉDIMENTS (VASES)

Les sédiments se composent d'une fraction solide et d'une fraction liquide (eau) qui est intimement liées les unes aux autres. Les proportions respectives de chacune de ces fractions sont variables d'un milieu à un autre mais demeurent dans une fourchette, qui par expérience, peut être estimée si l'on considère des matériaux de type vase [1].

IL y a quatre éléments principaux constitues les vases :

1. La matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates)

❖ **Le quartz**

Le quartz se trouve dans presque tous les environnements géologiques. C'est un constituant commun dans la plupart des types de roches et des groupes de sol. Le granit, le grès, le calcaire et la plupart des roches ignées, sédimentaires et métamorphiques contiennent du quartz. Le quartz contient principalement de l'oxygène et du silicium. Ces deux composants constituent jusqu'à 75% de la croûte terrestre. Un autre nom pour le groupe Quartz est le groupe silice. Le quartz est omniprésent, abondant et durable. Il est chimiquement inerte au contact de la plupart des substances [4].

2. La fraction argileuse (kaolin, illite et smectite).

Les argiles sont des silicates d'aluminium hydratés qui présentent une structure cristalline en feuillets. Cette constitution permet l'hydratation des argiles, avec parfois un phénomène de gonflement très important. Les principales caractéristiques sont : leur grande surface

spécifique, leur permettant de fortes capacités d'échange cationique (donc d'adsorption), leur capacité de rétention de l'eau, leurs propriétés colloïdales [2]. Classification des différentes argiles selon la structure chimique :

❖ **Kaolin**

Cette roche argileuse tire son nom du site chinois kao-Ling, où elle fut découverte. Son nom est dérivé du terme chinois "gao ling" traduit par "hautes collines". On appelle la roche kaolin et la minérale argileuse kaolinite. Cette argile blanche, douce, friable, réfractaire, contient autant d'aluminium que de silice [5]. Riche en silice et peu concentrée en sels minéraux, elle est utilisée pour la fabrication de porcelaine et de céramique. C'est une des rares argiles inertes chimiquement [6]. Elle a pour formule $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$.

❖ **Illites**

Son nom fait référence à l'Illinois, aux États-Unis où elle a été étudiée. Sa composition est riche en calcium (14%), en fer (9%) et pauvre en magnésium. Elle présente un bon pouvoir d'absorption environ 25 % de son poids et un faible pouvoir d'adsorption [7]. Malgré sa composition, elle est tout de même de qualité inférieure à la Montmorillonite. Elle se révèle néanmoins avoir un pouvoir d'absorption important. On l'utilise pour absorber des impuretés (déchets organiques, micro-organismes) [8].

❖ **Smectites**

Cette famille d'argile regroupe les montmorillonites, les bentonites, les saponites, les nontronites, les beidellites, [9]. Ces différentes argiles sont connues pour leur capacité à piéger les molécules d'eau. Elles sont appelées argiles gonflantes. Sous l'action de l'eau, elles peuvent augmenter leur volume jusqu'à 30%. En piégeant l'eau elles fixent aussi des cations permettant les échanges par adsorption [8].

3. **La fraction organique** (débris végétaux, micro-organismes, acide fulvique et humiques).

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 biosynthétisés par la microflore. La décomposition de ces matières est très lente (plusieurs centaines d'années). En

général, la proportion massique de matière organique est de l'ordre de 2 à 10 % pour les sédiments des cours d'eaux [10].

4. **Une certaine quantité d'eau**, présente sous différentes formes.

La teneur en eau dans la vase est très variable. Généralement, on peut distinguer l'eau libre, l'eau colloïdale et l'eau pelliculaire [11].

- L'eau libre qui n'est pas liée aux fines.
- L'eau capillaire est liée à la matrice solide par des forces de capillarité qui créent entre les grains des forces d'attraction.
- L'eau colloïdale permet l'hydratation des colloïdes. De même que l'eau capillaire, elle peut être éliminée par des procédés mécaniques de séparation solide-liquide.
- L'eau adsorbée et pelliculaire est liée à la surface des particules et constitue un film autour d'elles. Cette dernière n'est séparable de la matrice solide que par des moyens thermiques.
- L'eau de constitution entre dans les formules chimiques des substances pour former les substances hydratées [12].

IV.4. GRANULOMÉTRIE DES SÉDIMENTS

La distribution granulométrique d'un sédiment constitue son empreinte physique, elle caractérise la taille des particules, constituant la phase solide du matériau. Pour l'obtenir, il est procédé à un tamisage mécanique. En dessous d'une taille de 20 μm , il est nécessaire de recourir à des mesures au laser, qui utilisent le principe de la diffraction de la lumière cohérente sur un écoulement d'une suspension très diluée de fines. Il est communément considéré que les «Vases» correspondent à la fraction inférieure à 63 μm [12].

Les sédiments se caractérisent également par leur granulométrie. Le tableau IV.1 détaille le classement granulométrique des sédiments utilisé en géologie.

Tableau IV.1. Classement granulométrique des sédiments

Taille	Donomination
>20 cm	Blocs
2 cm à 20 cm	Galets et cailloux
2 mm à 2 cm	Graviers
63 μ m à 2 mm	Sables (grossiers et fins)
2 μ m à 63 μ m	Limons (ou silt)
<2 μ m	Vases, boues argileuses

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 [13].

IV.5. ENVASEMENT DES BARRAGES

L'aménagement des cours d'eau modifie l'hydrologie de la partie aval d'un barrage et entrave le transport solide vers les exutoires naturels. Les précipitations provoquent un ruissellement qui entraîne les particules solides par charriage par le biais des cours d'eau, et au niveau du barrage, cette coulée boueuse, appelée communément vase, s'arrêtera et constituera un dépôt qu'on nommera « volume mort ». C'est le processus d'envasement ou encore la sédimentation dans les barrages qui pose d'énormes problèmes au niveau du réservoir lui-même mais aussi en amont et en aval du réservoir [14]. L'envasement des retenues est, de ce point de vue, un phénomène inéluctable que tous les réservoirs subissent plus ou moins selon leur implantation et leur possibilité de gestion. Pour un site donné, la nature et le volume des dépôts dépend d'un certain nombre de facteurs tels que la géologie des sols du bassin versant, le régime climatique de la vallée, le régime hydrologique du cours d'eau, la couverture végétale du bassin versant, son degré d'activités humaines...etc. Certains barrages sont complètement envasés ; ils ne contiennent pratiquement que de la vase, cas du barrage Fergoug par exemple,

dont le taux d'envasement est de plus de 80 %. Les barrages se transforment de plus en plus en réceptacles de vase que d'eau [15].

IV.6. LES TECHNIQUES DE DÉVASEMENT

Les opérations de dévasement peuvent s'effectuer suivant deux techniques en fonction de la nature et du degré de consolidation des sédiments piégés : remobilisation des sédiments par des opérations de chasse durant les périodes des crues. Dans le cas contraire, ce sont les actions mécaniques par dragage qui donnent des résultats plus satisfaisants. Néanmoins c'est l'opération la plus coûteuse [2].

Les techniques de dévasement des barrages peuvent être résumées globalement par les deux moyens suivants :

❖ Le soutirage

Selon Remini B.[16], le moyen le moins coûteux reste l'évacuation des sédiments par les pertuis de vidange du barrage qu'il préfère appeler « technique de soutirage ». En effet un système de batteries de vannes spécialement conçues pour l'entraînement des sédiments est nécessaire. Son application est conseillée à certains sites qui favorisent l'apparition de courants de densité. Ces courants de densité sont très concentrés en sédiments, qui nécessitent l'ouverture des vannes de fond et de dégager le maximum de sédiments avec une perte d'eau minimum.

La mauvaise utilisation de cette technique de soutirage a entraîné l'obturation des vannes des barrages d'**Oued El Fodda** (1948) et **Foum El Gherza** (1982), l'abandon du barrage des Cheurfas I (1966) et le comblement de 80% du barrage de **Fergoug** (1984) dû au mauvais soutirage au niveau du barrage de Bou Hanifia (se trouvant en amont du Fergoug sur la même rivière). C'est la méconnaissance du phénomène des courants de densité et du comportement des vases dans les réservoirs qui fut la principale cause de cet échec [2].

❖ Le dragage.

Le dragage est une opération ayant pour objet le prélèvement de matériaux, notamment boues, limons, sables et graviers, au fond d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau à l'aide de moyens mécanique (figure IV.1), hydraulique ou pneumatique dans un but d'aménagement ou

d'entretien, c'est-à-dire tous travaux nécessaires pour rétablir un cours d'eau dans sa largeur et sa profondeur naturelle [1].



Figure IV.1. Engin mécanique de dragage [13]

Le premier barrage ayant subi des opérations de dragage en Algérie est celui de **Fergoug**, situé dans la région de Perrégaux (ouest algérien) : de 1986 à 1989 plus de dix (10) millions de m³ de vase ont été dragués (figure IV.2.). La figure IV.3 montre une opération de dragage du barrage de **Foum-El-Gherza** (Biskra) [2].



Figure IV.2. Opération de dragage du barrage de Fergoug en 2007[17]



Figure IV.3. Dragage activant dans la retenue du barrage Foum-El-Gherza (Biskra) [2]

IV.7. LES TECHNIQUES DE DRAGAGE DISPONIBLES

Différentes techniques de dragage ont été développées. Il est courant de classer les équipements de dragage selon leur principe général de fonctionnement, trois catégories peuvent être recensées :

❖ Les dragages mécaniques

Ils s'effectuent grâce à des engins à godet qui opèrent soit depuis les berges (pelle mécanique), soit depuis la surface (pelle sur ponton, drague à godet...etc.) [18]

❖ Les dragages hydrauliques

❖ Il est réalisé par des dragues désagrégées et aspiratrices, les matériaux sont désagrégés par jets d'eau sous pression ou par rotation d'un outil et mis en suspension pour être aspirés et évacués par des pompes vers les points de stockage [18]

❖ Les dragages à l'américaine

C'est une technique particulière qui consiste à provoquer la remise en suspension des sédiments au moyen d'une hélice ou d'air comprimé dans les cours d'eau ou chenaux à fort courant. Les sédiments sont repris dans le flux et se déposent le plus souvent en aval [19].

IV.8. ÉTAT DE L'ART SUR LA VALORISATION DES SÉDIMENTS DANS LE GÉNIE-CIVIL

Pour la gestion des sédiments, la solution est limitée principalement à la mise en dépôt à terre.

Cette solution est jugée trop coûteuse (surface de terrain utilisée, frais de transport,) mais aussi dangereuse (risque de pollution et dispersion des contaminants vers l'eau souterraine et dans l'environnement) [2]. Dans un contexte de développement durable, la valorisation des sédiments dans le génie civil permet de faire face au manque de gisements et à l'épuisement de granulats. Le domaine de la construction consomme des quantités importantes en granulats. La plupart de cette quantité provient de carrières naturelles. D'un autre côté, le volume annuel de sédiments dragués est de plusieurs millions de mètres cubes. Par conséquent, ce volume important peut constituer une source d'approvisionnement en granulats pour le secteur de la construction. La composition principale du sédiment est le sable, l'argile et le calcaire. Le pourcentage de ces derniers peut varier selon l'origine du sédiment. La variation dans la composition permet aux sédiments d'avoir un potentiel de valorisation très variable dans le génie civil : soit dans la construction des routes, soit comme granulat dans le béton, soit comme matière première dans la fabrication du ciment ou des briques [2].

IV.8.1. Valorisation des sédiments dans le béton et le mortier

L'utilisation des sédiments de dragage sous forme d'additions est amenée à se développer pour répondre aux besoins croissants de la filière de fabrication de béton. L'intégration des sédiments comme constituant dans les matériaux cimentaires peut être envisagée à condition que ceux-ci possèdent un caractère pouzzolanique. Ce caractère est acquis après traitement thermique (calcination) afin de rendre ces sédiments réactifs avec le ciment.

Plusieurs recherches de magister et de doctorat ont été réalisées évoquant la possibilité de fabriquer des mortiers [21] et des bétons [22] dont le ciment est composé de vase calcinée utilisant des dosages allant jusqu'à 20 %.

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

En Algérie des études de valorisation des vases de dragage de barrages ont été faites, Belas et al. [23] ont étudié des pâtes et des bétons contenant différents pourcentages de la vase du de Fergoug en substitution par rapport au dosage en masse du ciment (0%,10 %, 15 % et 20 %) avec une même maniabilité, vis-à-vis du comportement mécanique (compression et traction) et du retrait. Les résistances mécaniques à la compression simple et le retrait (total et endogène) de différents mélanges sont présentées respectivement sur les figures IV.4 et IV.5

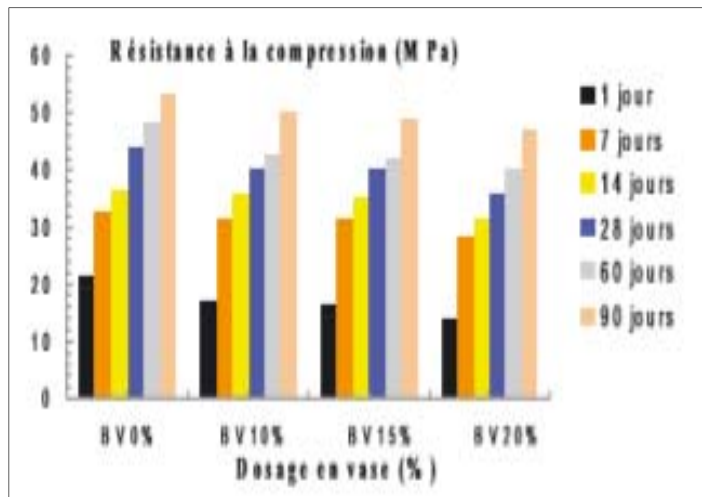
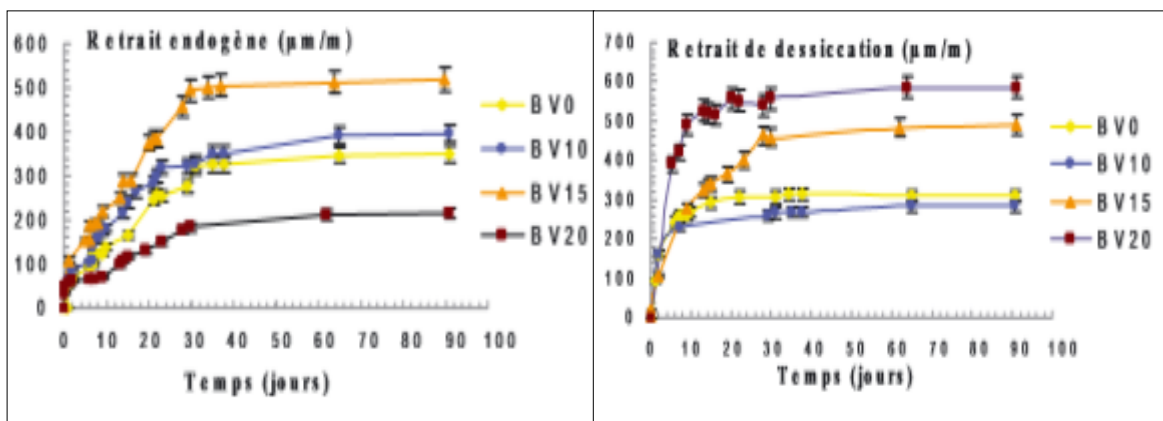


Figure IV.4. Évolution des résistances à la compression en fonction du temps et du dosage en vase [23].



(a)

(b)

Figure IV.5. Évolution du retrait endogène (a) et de dessiccation (b) en fonction du temps et des dosages en vase [23].

Les auteurs ont obtenu que pour des échéances supérieures à 90 jours, les résistances auront évolué au-delà du béton témoin. Cette cinétique de développement des résistances s'explique par l'activité pouzzolanique de la vase. Quant au le retrait endogène de BV0 et BV10 présente des évolutions très proches, contrairement à celui du BV15 qui présente un pic dans les déformations alors que le BV20 est caractérisé par un retrait endogène plus faible. Pendant que le BV10 développe un retrait de dessiccation le plus faible et qui s'approche de celui du BV0 à toutes les échéances.

Aussi bien que, Belarbi .2015 [24] a étudié les caractéristiques mécaniques de 19 combinaisons de mortiers normalisés soit 342 spécimens et ce à partir de différents pourcentages d'ajout : (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30%) pouzzolane naturelle « PZ », vase de Chorfa « VC » et vase de Fergoug « VF » avec un rapport E/C = 0.5. Il est à noter que les essais mécaniques ont été effectués aux échéances de : 2 – 7 – 14 – 28 – 60 – 90 et 180 jours. Il a montré que les performances mécaniques se développent durant les premiers jours de l'hydratation, plus rapidement pour les mortiers à base de 10 et 20 % des vases que pour le mortier témoin ce qui n'est pas le cas des mortiers à 30 % de vases (figure IV.6).

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

À l'échéance de 180 jours, les mortiers à base de vase de Chorfa développent des résistances à la compression supérieures à celles du mortier à base de vase de Fergoug.

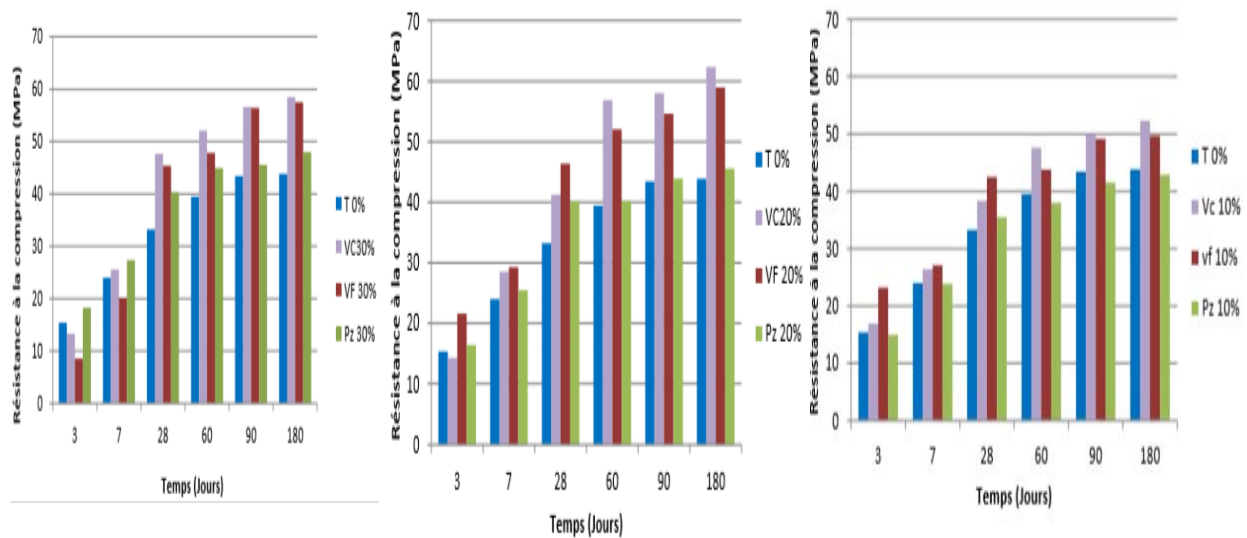


Figure IV.6. Comparaison des évolutions des résistances en compression des mortiers à (10%, 20% et 30%) de vase de Chorfa, de Fergoug et de pouzzolane naturelle [24].

Dans le même ordre d'idées, Safer et al. [25] ont étudié la résistance à la compression du béton vibré contenant de sédiments traités (0%, 10%, 20% et 30%). Ils ont constaté que la vase du barrage de Chorfa II améliore la résistance à la compression à long terme du béton (figure IV.7).

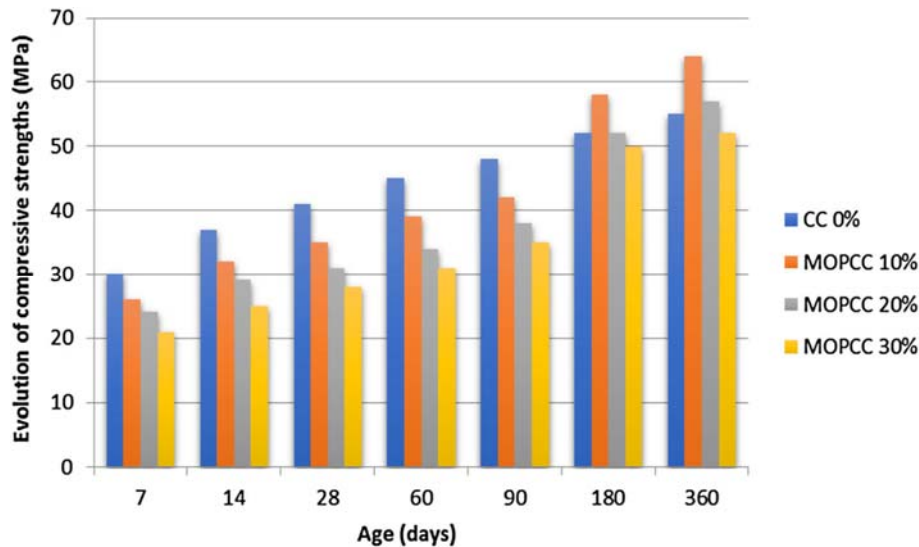


Figure IV.7. Résistances à la compression des bétons en MPa en fonction du temps [25]

Pareillement, Belguesmia et al. [26] ont étudié l'effet de la vase calcinée (0%, 10%, 20% et 30%) sur la résistance à la compression du béton autoplaçant (figure IV.8). Ils ont indiqué 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. 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 supérieures à celles des deux autres BAP. Cela peut être expliqué par l'effet pouzzolanique du métakaolin issu de la calcination 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.

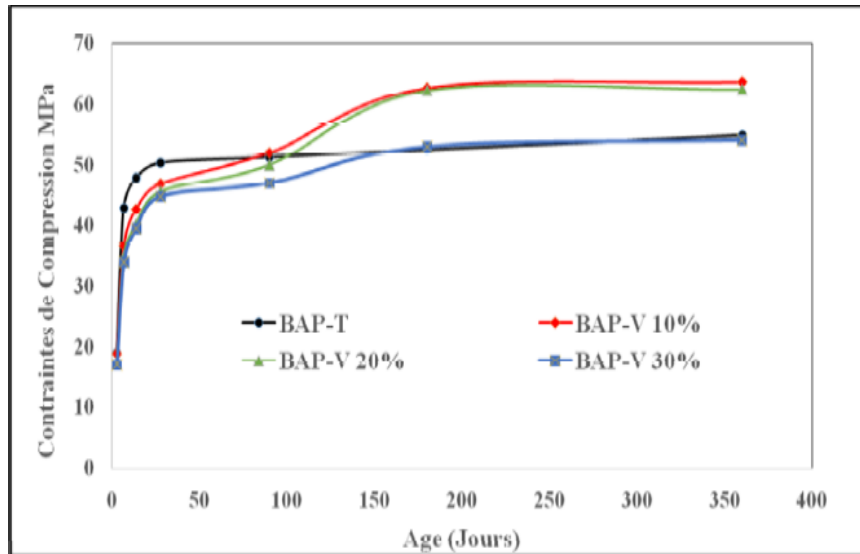


Figure IV.8. Courbes d'évolution des résistances à la compression des BAP[26]

Bouhamou et al. [27] ont étudié l'effet de la vase calcinée du barrage de Fergoug (Ouest Algérien) sur les propriétés fraîches, mécaniques et différées des mélanges de BAP contenant 0, 10, 15 et 20% de sédiments traités. Le retrait endogène et de total de différents mélanges sont présentés sur la figure IV. 9.

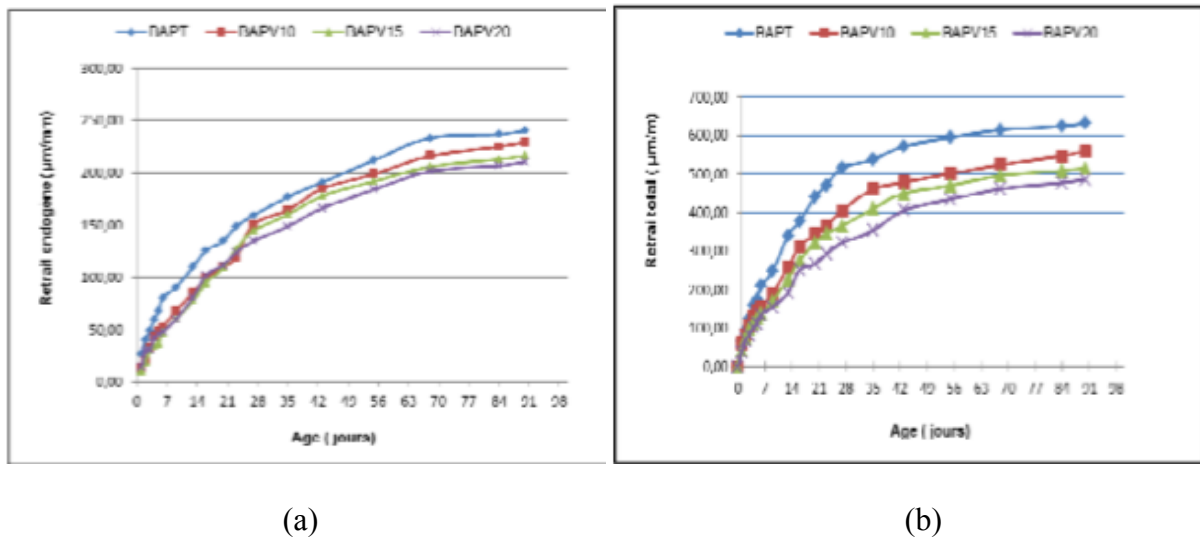


Figure IV.9. Évolution du retrait endogène (a) et total (b) en fonction du temps des BAP [27]

Les auteurs ont signalé que l'utilisation de la vase calcinée dans le BAP réduit le retrait total, endogène et de dessiccation par rapport au BAP témoin.

Taieb et al. [28] ont étudié l'effet de la vase calcinée (0%,10%,20% et 30%) sur la résistance à la compression et sur le retrait libre du béton autoplaçant. Les résistances mécaniques à la compression simple de différents mélanges sont présentées sur la figure IV.10. Le retrait endogène et de total de différents mélanges sont présentés sur la figure IV.11.

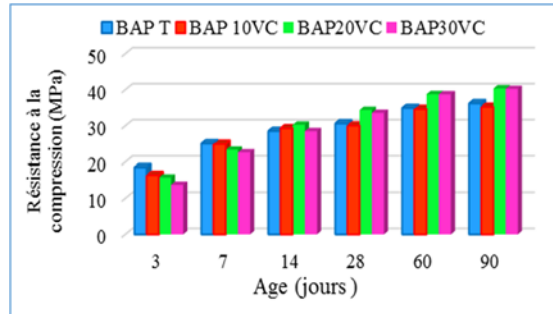


Figure IV.10. Évolution de la résistance à la compression des BAP [28]

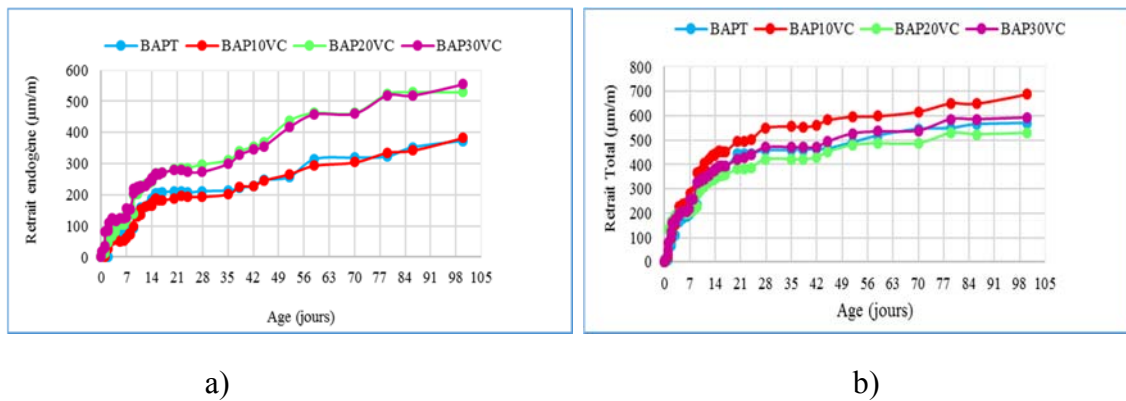


Figure IV.11. Évolution du retrait endogène (a) et total (b) en fonction du temps des BAP [28]

D'après les résultats obtenus, les auteurs ont constaté que l'inclusion de la vase augmentait la résistance à la compression et que la présence de la vase à des taux de 20% et 30% fait diminuer le retrait de dessiccation et total, cela est le résultat de leur contribution à l'amélioration de la microstructure.

Agostini F. [29] a étudié des sédiments contaminés. Dans son travail, il a utilisé un processus de traitement appelé le processus Novosol. Les produits traités ont été ensuite utilisés dans les mortiers en remplacement des granulats naturels. Quatre types de mortier ont été réalisés : mortier de référence MR, mortiers à 33% ; 66% ; 100 % de remplacement du sable par le sédiment traité.

La résistance à la compression, le module d'Young, la perméabilité au gaz, la porosité, la masse volumique ont été mesurés sur divers échantillons à l'âge de 28, 60 et 90 jours. Les résultats ont montré que lorsque la quantité de sédiment dans le mélange augmente, la porosité augmente et la masse volumique diminue. La valeur de la perméabilité intrinsèque du mélange MS33 est très proche de celle du mortier de référence MR ; en revanche les valeurs correspondant à MS66 et MS100 sont plus grandes de trois (03) fois par rapport aux deux premiers. Des mesures de retrait ont aussi été effectuées.

Elles ont montré qu'à l'âge de 110 jours, la déformation de MS100 est jusqu'à neuf (09) fois supérieure à celle de MR. Pour les substitutions inférieures, les déformations finales sont trois à six fois supérieures à celle du mortier de référence. De larges fissures ont été observées rapidement sur l'échantillon MS100. Ce phénomène n'a pas été observé ni sur MS33 ni sur MS66. En ce qui concerne la résistance à la compression, les résultats montrent que l'introduction des sédiments traités dans les mortiers conduit à l'amélioration de la résistance à la compression. Une augmentation de 20% est obtenue pour MS33. Selon la courbe de compression en fonction du taux de substitution, la valeur optimale se trouve avoisine les 33%. Hors de cette zone, la résistance diminue, mais elle est encore plus grande que celle du mortier de référence.

Les auteurs ont conclu que le processus Novosol permet de traiter efficacement les sédiments dragués et contaminés puisqu'il fixe les métaux lourds dans la matrice d'apatite et élimine les combinaisons organiques et que le produit obtenu peut être utilisé comme du sable avec un taux de substitution optimal d'environ 33% .

Ben Allal L. et al [30] ont étudié la valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc) dans les mortiers par substitution du sable. Les valeurs des résistances à la compression obtenues ont confirmé qu'une substitution partielle du sable par des sédiments de dragage des ports de Tanger et de Larache dans les mortiers est satisfaisante pour un dosage de 20% .

IV.8.2. Valorisation des sédiments dans la fabrication du ciment

La composition chimique des sédiments (principalement de la silice, quartz, calcite, ...) rappelle celle de la matière brute utilisée pour la fabrication du clinker. L'idée est que l'on peut les utiliser dans l'industrie cimentaire.

Or très peu d'études existent sur ce sujet. C'est en 2004 que l'étude de cette solution a débuté par Dalton et al. [31] cité dans [32]. Ils ont fabriqué du clinker en présence de sédiments et ceci a deux niveaux : au niveau du laboratoire (bench scale) et au niveau semi industriel (pilot scale), la référence étant le ciment Portland ordinaire industriel (full scale).

Dang T.A. [32] a étudié la possibilité d'utilisation des sédiments provenant du piège de Lyvet aménagé sur la Rance et de la baie de Mont Saint Michel. Après une caractérisation physico-chimique des sédiments bruts faisant appel à diverses techniques (DRX, ATG –ATD, MEB...), un traitement thermique à 650°C et 850°C a été adopté. Ce traitement permet d'éliminer des matières organiques et d'activer des argiles. Les sédiments traités ont été ensuite ajoutés selon différents dosages (8, 16, 33% par rapport à la masse sèche du liant) à du ciment Portland ordinaire afin de développer de nouveaux liants de type ciments Portland composés. Ces nouveaux liants ont ensuite été caractérisés (temps de prise, pouzzolanicité, résistance en compression, module d'Young, perméabilité au gaz...etc.). Les résultats ont montré que même si les nouveaux liants ne présentent pas de caractère de pouzzolanicité selon la norme NF EN 196-5, ils développent des propriétés mécaniques et de transfert intéressant par rapport à un ajout inerte. La classe de résistance de ces liants a été déterminée selon la norme NF EN 196-1.

Les résultats ont montré que les sédiments calcines a 650°C pourraient être utilisés jusqu'à 35% pour obtenir des liants de classe 42,5, alors que les sédiments calcinés à 850°C ne vérifient que la classe 32,5.

Quant à Semcha [15], il a étudié la possibilité de réutilisation de la vase prélevée à l'état solide, dans la zone de rejet sur Oued El Hammam (en aval du barrage de Fergoug) ainsi que dans la région de la Macta dans la fabrication du ciment.

Les cimenteries algériennes utilisent, pour la production d'un ciment composé de type CEM II de classe élevée, une pouzzolane naturelle.

L'étude a amené à la conception d'une pouzzolane artificielle par traitement thermique (750°C) de la fraction argileuse des vases issues du barrage de Fergoug. Des micro-éprouvettes de pâte durcie ont été fabriquées et soumises à des essais de compression uniaxiale afin d'en estimer leur réactivité pouzzolanique. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus avec la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, dans les mêmes conditions expérimentales.

La comparaison des résultats obtenus sur les deux matériaux étudiés permet de retenir en conclusion les principaux éléments suivants :

- Ces deux matériaux peuvent trouver des applications aussi bien pour la production de ciment composé de type CEM II, que pour la fabrication de liants pouzzolaniques,
- Un meilleur comportement est observé pour la pouzzolane de synthèse à base de vase calcinée ont dépassé celles obtenues avec de la pozzolane naturelle de Béni-Saf. Les deux procédés traduisent un véritable intérêt économique.

IV.8.3. Valorisation des sédiments dans la fabrication de briques

La fabrication de briques à partir des sédiments de dragage constitue une autre voie de valorisation.

BEN ALLAL L., et al. [30] ont étudié la valorisation des sédiments provenant des ports de Larache et de Tanger comme matière première dans la fabrication de briques. Les sédiments ont été utilisés dans la fabrication de briques par substitution partielle de l'argile entrant dans la formulation. La confection des briques a été réalisée au sein même d'une briqueterie. La préparation des échantillons de briques consiste en un mélange de 70% de sédiments et 30% d'argile. Après séchage à l'air libre, les matériaux sont broyés puis tamisés à un (01) mm. Après malaxage, moulage et séchage de la pâte, les briques-éprouvettes sont séchées à une température de cuisson de 920 °C pendant 32 heures. Les premiers constats sont encourageants puisque la fabrication de briques s'est révélée possible.

Semcha A. [15] s'est intéressé à la fabrication de la brique autoclavée à base de vase. La vase prélevée à l'état solide, dans la zone de rejet sur Oued El Hammam (en aval du barrage) ainsi que dans la région de la Macta, stabilisée au ciment dans des conditions particulières de température, d'humidité et de pression, a donné des résistances à la compression comparables à celles de la brique silico-calcaire. Le procédé de conception est inspiré de celui décrit pour le composite à base de quartz [33].

L'activateur chimique utilisé est le ciment Portland ordinaire (CEM I). Les étapes essentielles de la production du composite sont les suivantes : broyage et nettoyage de la vase crue, dosage des mélanges, malaxages à sec et humide, moulage et pressage, autoclavage pendant 6, 15 et 24 heures.

Après le séjour en bain hydrothermal à une température de 135 °C et une pression de 3,3 bars, les éprouvettes (4x4x16 cm) sont testées à la compression et les résidus analysés. Une résistance à la compression de l'ordre de 40 MPa est obtenue pour un mélange de 40% de ciment et 60% de vase. Cette résistance est très suffisante pour un moellon à bâtir.

D'autres travaux de recherche ont été réalisés, notamment [34-36]. Ils ont fabriqué des briques à partir d'un mélange de sédiments et d'argile par traitement thermique.

IV.8.4. Valorisation des sédiments dans la construction des routes

Les projets d'infrastructures dans le domaine des travaux publics nécessitent d'importantes quantités de matériaux. Les matériaux naturels se font rares et coûteux. Confrontées à la nécessité de trouver des granulats en grande quantité et à faible coût, les entreprises routières se sont rapidement intéressées aux matériaux de recyclage. Ce sujet a été étudié par plusieurs auteurs. Tous les résultats ont donné des avis favorables sur l'utilisation des sédiments dans la construction des routes. Avant qu'ils soient utilisables, les sédiments doivent être traités pour que leurs caractéristiques physico-mécaniques soient satisfaisantes vis-à-vis des critères géotechniques de la construction routière. Les sédiments se caractérisent par une importante teneur en eau (jusqu'à 200%), en sels (pour les sédiments marins), en argile, en matière organique et parfois en métaux lourds. Ce sont les principaux facteurs qui empêchent l'utilisation des sédiments sans traitement [2].

IV.9. PRÉSENTATION DU BARRAGE DE CHORFA II

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 d'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.12, présente la situation donnée par satellite du barrage Chorfa II :



Figure IV.12. Situation donnée par satellite du barrage Chorfa II.

La situation géographique du barrage de Chorfa II est représentée sur les figures IV.13 et IV.14.

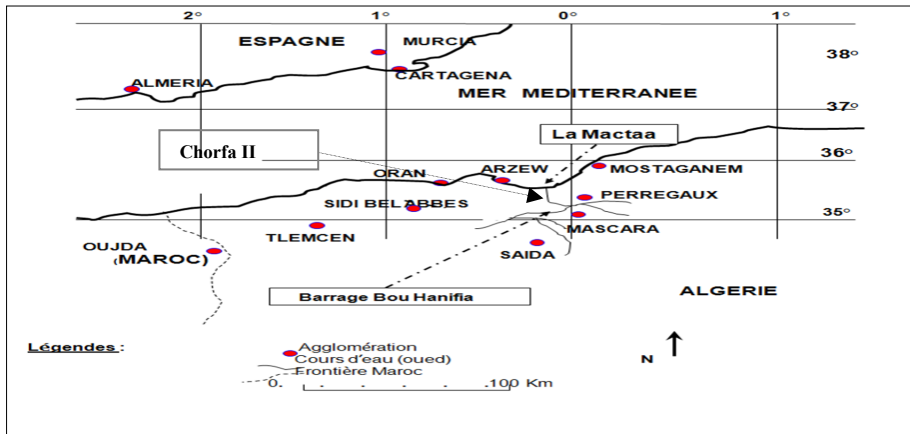


Figure IV.13. Situation géographique de la ville de Mascara et du barrage de Chorfa II



Figure IV.14. Situation géographique du barrage de Chorfa II.

Ce barrage a connu depuis sa mise en exploitation, un énorme problème d'envasement qui a diminué sa capacité jusqu'à 80%. Il est envasé actuellement à plus d'un million de m³ /ans.

Les figures IV.15, IV.16, IV.17, IV.18, IV.19 représentent des photos réelles du barrage de Chorfa II.



Figure IV.15. Vue générale du barrage Chorfa II



Figure IV.16. La digue du barrage Chorfa II



Figure IV.17. Vue du côté interne de la digue du barrage Chorfa II

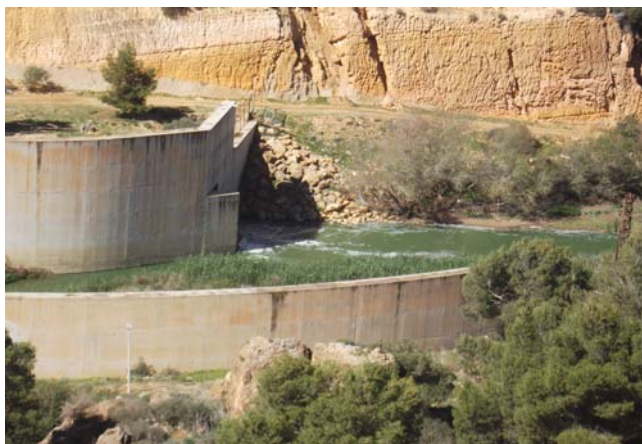


Figure IV.18. Vue du côté interne de la digue du barrage Chorfa II



(a)



(b)

Figure IV.19. (a) vanne du barrage Chorfa II (b) Envasement du côté interne du barrage Chorfa II.

IV.10. CONCLUSIONS

La mise en décharge de sédiments dragués pose des problèmes environnementaux importants. La gestion des matériaux de dragage favorise donc la valorisation en satisfaisant les exigences techniques, économiques et environnementales. En effet, il existe plusieurs éléments perturbateurs dans les sédiments : métaux lourds, azotes, phosphates et notamment les matières organiques. Ces substances ont des effets néfastes, c'est pourquoi il est impératif de procéder à un traitement par : dépollution et élimination. Nous sommes arrivés à conclure que parmi les voies de valorisation, nous avons constaté que la réutilisation des sédiments en génie civil est une perspective intéressante. Les sédiments présentent de faibles propriétés mécaniques et pour leur donner une performance mécanique adéquate, un ajout de correcteur granulométrique suivi d'un traitement par le ciment et/ou la chaux est une technique efficace, le liant hydraulique permet de créer des liaisons entre ces particules, ce qui améliore les caractéristiques géotechniques et mécaniques du sédiment. Néanmoins la littérature est maigre en ce qui concerne la possibilité de valorisation dans le génie civil spécialement dans la confection des matériaux cimentaires. L'un des chercheurs pionniers dans ce domaine est Semcha [15] qui a fait une étude pour la fabrication d'un ciment de synthèse à base de vase calcinée, les résultats étaient très satisfaisants, les essais de caractérisation des mortiers ont révélé que cette addition pouzzolanique artificielle prévale dans ces propriétés mécaniques ceux enregistrées par les pouzzolanes naturelles.

La valorisation de sédiments de dragage du barrage de Chorfa II de la wilaya de Mascara dans la confection des mortiers de béton autoplaçant équivalent semble être une alternative bien fondée par rapport aux caractéristiques prometteuses de ces matériaux.

L'objectif de cette étude est multiple. Du point de vue du matériau, il s'agit d'une part d'obtenir des MBAPE écologiques, économiques et technologiques pour réaliser la valorisation de ces sédiments de dragage qui sont considérés comme nuisible à l'environnement et d'autre part de voir s'ils contribuent à la diminution du retrait des MBAPE dans lequel ils sont incorporés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **BENASLA M.**, « Caractérisation de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda et valorisation en tant que matériau de construction ». Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2015.
- [2] **SEKLAOUI-OUKID O.**, « Valorisation des sédiments du barrage d'elMerdja sidi Abed : étude technico-économique ». Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri- Tizi-Ouzou, <https://dl.ummo.dz/handle/ummo/1228>, 2016.
- [3] **ALOU-LABIOD Z.**, « Étude de l'amélioration des caractéristiques Physico-chimiques de la Sebkhia d'Oran en vue d'arrêter son étendue ». Thèse Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2014.
- [4] **BALASUBRAMANIAN A.**, « Quartz group of minerals ». Centre for advanced studies in Earth Science University of mysore technical report. Octobre 2017 DOI : 10.13140/RG.2.2.21495.52648, MYSORE-6.
- [5] **MERABET D., BELKACEMI H.**, « Caractérisation minéralogique et chimique du kaolin de Tamazert (Algérie) », *Annales de Chimie Science des Matériaux* (Vol. 28, No. 5, pp. 61-83). No longer published by Elsevier, Octobre 2003.
- [6] **LIETARD O.**, « Contribution à l'étude des propriétés physicochimiques, cristallographiques et morphologiques des kaolins ». Thèse doct. Ès sciences. 322p. INPL Nancy.
- [7] **HOWER J.**, « T. C. Mowatt, the mineralogy of illites and mixed-layer illite/montmorillonites. *American Mineralogist* ». Vol. 51, no 5-6, 1900.
- [8] **HERNOT F.**, « L'argile, son utilisation à l'officine ». Thèse de doctorat, Université Angers, 2016
- [9] **D. MOORE M.**, « R. C. Reynolds: X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals ». Vol. 378. Oxford: Oxford university press, 1989.
- [10] **SHNEIDER G.**, « Le curage des sédiments des cours d'eau ». *Le courrier de l'environnement de l'INRA*, vol. 43, pp. 146-147, 2001.
- [11] **MAROT F.**, « Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques ». Orleans, France : BRGM, 1998.
- [12] **PROULHAC N., LANN K.**, « Rapport Final du Schéma Directeur de gestion et de valorisation des sédiments de dragage de Rouen et Tancarville ». Département de La Gironde. Bassin d'Arcachon, 2006.

- [13] **BELGUESMIA K.**, « Optimisation d'un éco-BAP à base de sédiment de dragage vis-à-vis des états frais, durci et de la durabilité ». Thèse de doctorat, Université des sciences et de technologie, Mostaganem, 01 Juillet ,2018.
- [14] **MRABET A** et **LABIOD Z.**, « Processus d'envasement des barrages cas du barrage Chorffa ». Quatrième colloque internationale sur les ressources en eau dans le bassin méditerranéen 22, 23 et 24 Mars 2008.
- [15] **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.
- [16] **REMINI B.**, « Évolution de la sédimentation dans les retenues de barrage et le soutirage des particules fines ». Courrier du savoir – n°02, Juin 2002, pp. 29-34.
- [17] **MOSTEFA F.**, « Étude du comportement d'un béton Autoplaçant à base de sédiment de dragage vis-à-vis du retrait ». Mémoire de Magister, Université des sciences et de technologie, Mostaganem, 23 Février, (2012).
- [18] **COOPER H.R.**, «Practical Dredging and Allied Subjects. Glasgow». Brown, Son and Ferguson, p.434, 1974.
- [19] **SCHNEIDER G.**, « Le curage des sédiments des cours d'eau ». Le courrier de l'environnement de l'INRA (France),2005.
- [20] **HAMOUCHE F.**, **ZENTAR R.**, « Caractérisation des matières organiques dans les sédiments de dragage par méthodes thermiques et chimiques en vue d'une valorisation dans le domaine des travaux routiers ». 35èmes Rencontres de l'AUGC, Université de Nantes, France, 21 au 24 Mai 2017.
- [21] **RAHMANI H.**, **RAMZANIANPOUR A.A.**, «Effect of silica fume and natural pozzolanas on sulfuric acid resistance of dense concretes». Asian journal of civil engineering (building and housing). VOL. 9, NO. 3, 2008, pp 303-319.
- [22] **GHRICI M.**, **KENAI S.**, **SAID-MANSOUR M.**, «Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements». Cement & Concrete Composites 29 (2007) 542–549.
- [23] **BELAS N.**, **BELARIBI O.**, **MEBROUKI A.**, **BOUHAMOU N.**, « Valorisation des sédiments de dragage dans les bétons ». INVACO2 : séminaire international, Rabat – Maroc / 23-25 Novembre 2011, n° 1P-173.

- [24] **BELARIBI O.**, « Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane ». Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise et Université de Mostaganem, 2015.
- [25] **SAFER O., BELAS N., BELARIBI O., BELGUESMIA K., BOUHAMOU N., and MEBROUKI A.**, « Valorization of dredged sediments as a component of vibrated concrete ». Durability of these concretes against sulfuric acid attack. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2018.
- [26] **BELGUESMIA K., BELAS B.N., AMIRI O., LEKLOU N., BELARIBI O.**, «Influence of treated sediment substitution percentage on workability». *Strength and porosity of SCC. J. Mater. Eng. Struc.* 5, 47–55 (2018).
- [27] **BOUHAMOU N., MOSTEFA F., MEBROUKI A., BELARIBI N., MESBAH A.H.**, « Étude du comportement d'un béton autoplaçant à base de vase de dragage vis-à-vis du retrait ». Colloque 01 éco matériaux. 24-28 Novembre, (2014).
- [28] **TAIEB F., BELAS N., BELARIBI O., BELGUESMIA K., and HADJ SADOK R.**, «Influence of calcined mud on the mechanical properties and shrinkage of self-compacting concrete». 2nd International Congress on Materials and Structural Stability (CMSS-2017). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814901026>.
- [29] **AGOSTINI F.**, « Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins ». Thèse de doctorat, école centrale de Lille, 2006.
- [30] **BEN ALLAL L., AMMARI M., FRAR I., AZMANI A., BELMOKHTAR N.**, «Caractérisation et valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc)». *Revue Paralia*. Volume 4 pp 5.1-5.13, 2011.
- [31] **DALTON J.L., GARDNER K.H., SEAGER T.P., WEIMER M.L., SPEAR JEAN C.M., MAGEE B.J.**, «Properties of Portland cement made from contaminated sediments ». *Resources, conservation and recycling*. Vol. 41, pages 227-241, 2004.
- [32] **DANG T.A.**, « Valorisation des sédiments marins bretons comme matériaux de construction ». Thèse de doctorat de l'INSA Rennes, 2011.
- [33] **BENAMARA L.**, « Conception d'éléments de toiture pour pays en voie de développement ». Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, 1990.
- [34] **HAMER K., ET KARIUS V.**, «Brick production with dredged harbour sediments». *An industrialscale experiment. Waste management*. Volume 22, issue 5, PP 521-530, 2002.

[35] LAFHAJ Z., et AL., «Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with Novosol process and valorization in clay bricks». *Construction and Building Materials*, 2007, volume 148 pages 606-612.

[36] SAMARA M., et AL., « Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment». *Journal of Hazardous Materials*. Volume 163 pages 701-710, 2009.

**PROBLÉMATIQUE ET
OBJECTIFS DE LA
RECHERCHE**

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

L'envasement des barrages a causé des problèmes non seulement techniques (arrêt d'exploitation du barrage), mais aussi environnementaux (stockage de la vase), malgré que les techniques de dévasement soient des moyens efficaces pour lutter contre ce fléau. Néanmoins, l'évacuation de cette vase pose un problème écologique.

Le barrage Chorfa II comme beaucoup d'autres barrages 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 m³, soit un taux annuel d'envasement dépassant un million de m³. Et de là, la valorisation et l'exploitation de la vase de barrage Chorfa II représente pour cette recherche un champ important qu'il faut.

Le bilan de l'étude bibliographique précédente, fait apparaître des insuffisances notoires dans la connaissance de l'influence des différents paramètres de composition sur le retrait à court et à long terme de ces mortiers innovants. Très peu de réponses sont apportées actuellement.

Pour enrichir et approfondir les recherches entamées sur la vase extraite de barrage Chorfa II, notre étude consiste à la valoriser dans les MBAPE répondant aux normes en vigueur en vue de diminuer leur retrait. 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 industriel entrant dans la composition des matériaux cimentaires.

Le MBAPE est un mélange de ciment, d'eau, d'addition minérale et de superplastifiant. On peut obtenir une infinité de mortiers, en faisant varier les proportions de ces constituants. L'élaboration des mortiers de béton autolaçant équivalent résultent pour l'essentiel d'une approche empirique basée sur des tâtonnements en laboratoire, et il est certain que, parmi ces mortiers, tant par leur nature propre qu'en raison du travail à exécuter, certains seront mauvais, d'autres seront acceptables, d'autres enfin, les moins nombreux, seront bons. Par ailleurs, l'évolution des différents types de bétons a connu de nos jours un essor considérable, se traduisant par l'apparition des mortiers modernes jouissant d'une grande fluidité et d'une grande résistance, et l'usage des additions minérales dans ces mortiers est devenu incontournable.

L'incorporation des additions minérales est maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du mortier autoplaçant telle que la fluidité, la résistance, le retrait, la durabilité, etc. Ces additions affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance et le retrait des matériaux durcis.

Néanmoins, pour profiter pleinement de ces avantages, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de ces nouveaux composants (additions minérales) et leurs actions sur les propriétés différées libres des mortiers de béton autoplaçant équivalent.

Plusieurs travaux scientifiques se sont orientés vers la question pour étudier le phénomène de retrait et de trouver la formulation et composition adéquate pour le réduire. Aussi il est bon de faire remarquer que les phénomènes physico-chimiques qui sont à l'origine des déformations différées sont très loin de faire l'unanimité dans la communauté scientifique.

Notre problématique concerne le comportement des MBAPE contenant deux additions minérales (vase calcinée et cendres volantes) vis-à-vis du retrait à court et à long terme, nous allons plutôt se focaliser sur l'influence de sédiments traités sur le retrait plastique, la fissuration due au retrait empêché et le retrait libre (total, endogène et de dessiccation).

L'objectif de cette thèse est double. Du point de vue du matériau, il s'agit d'une part d'obtenir des MBAPE écologique, économique et technologique pour réaliser la valorisation de ces sédiments qui sont considérés comme nuisible à l'environnement et d'autre part de voir si on peut diminuer le retrait de ce matériau.

Pour ces raisons, nous avons étudié les propriétés rhéologiques, mécaniques et différées libres de pâte et de mortier autoplaçant réalisés avec l'incorporation de deux différentes additions minérales (vase calcinée et cendres volantes), où un programme expérimental a été engagé afin d'étudier le comportement à l'état frais et durci de six pâtes de liant et six mortiers autoplaçants à base de 22% de vase calcinée du barrage de Chorfa II ou des cendres volantes (Centrale thermique EDF de Cordemais -France).

PARTIE II.

MATÉRIAUX ET
PROGRAMME
EXPERIMENTAL

CHAPITRE I.

MATÉRIAUX

CHAPITRE I. MATÉRIAUX

I.1. INTRODUCTION

Dans le but de mettre en évidence l'influence de la vase calcinée ou des cendres volantes sur le retrait à court et à long terme des MBAPE. Nous avons adopté pour chaque MBAPE le même pourcentage d'addition minérale (22%) avec deux rapports E/L (0.39 et 0.47), le même volume total et le même volume de pâte.

Ce premier chapitre a pour objectif de présenter de manière synthétique les matériaux qui ont été utilisés durant cette étude et la méthode de formulation.

Les différentes manipulations utilisées pour la caractérisation des matériaux utilisés sont effectuées au niveau des laboratoires suivants :

- Laboratoire Construction Transport et Protection de l'Environnement (LCTPE), Université de Mostaganem
- Laboratoire IGCMO, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran
- Laboratoire L.T.P.O, (Oran).
- Laboratoire de la cimenterie LAFARGE à Sig (Mascara)
- Laboratoire de Génie Civil et de Génie Mécanique (LGCGM), Université Rennes 1 et INSA de Rennes.
- Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur et de l'Environnement LaSIE, Université de La Rochelle
- Laboratoire de Génie Civil et de Génie Mécanique (Gem), École Centrale de Nantes

I.2. MATÉRIAUX

Les matériaux utilisés dans cette étude sont décrits ci-après :

I.2.1. Ciment

Le ciment CEM I 52.5N-SR5 utilisé pour les différentes formulations de mortier selon les exigences de la norme NF EN 197-1 provient de la cimenterie Lafarge (France). Il a une surface Blaine de $3800 \text{ cm}^2 / \text{g}$ [1] selon la norme EN196-6 et une densité absolue de $3,13 \text{ g} / \text{cm}^3$ [1] selon la norme NFP18-555. Le choix de ce ciment sans addition est justifié par l'étude de l'effet de chaque addition sur le comportement des mortiers de béton autoplaçant équivalent.

Ce ciment présente une résistance moyenne en compression à 28 jours de 52,5 MPa. Le détail de sa composition minéralogique et chimique est donné dans les tableaux I.1 et I.2.

Tableau I.1. Composition minéralogique du clinker [1]

Les minéraux	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
%	62	22	8	8

Tableau I.2. Composition chimique du ciment [1]

Oxydes	Teneur massique (%)
SiO ₂	21
CaO	68
Fe ₂ O ₃	3.26
Al ₂ O ₃	5.81
MgO	1.2

I.2.2. Sable

Le sable utilisé est un sable 0/4 siliceux-Alluvionnaire provenant de la carrière La Repennelais (France) avec une densité de 2.58 g/cm³ (NFP 18-555) et un coefficient d'absorption d'eau de 1,2% [1]. La figure I.1 représente la courbe de l'analyse granulométrique du sable utilisé.

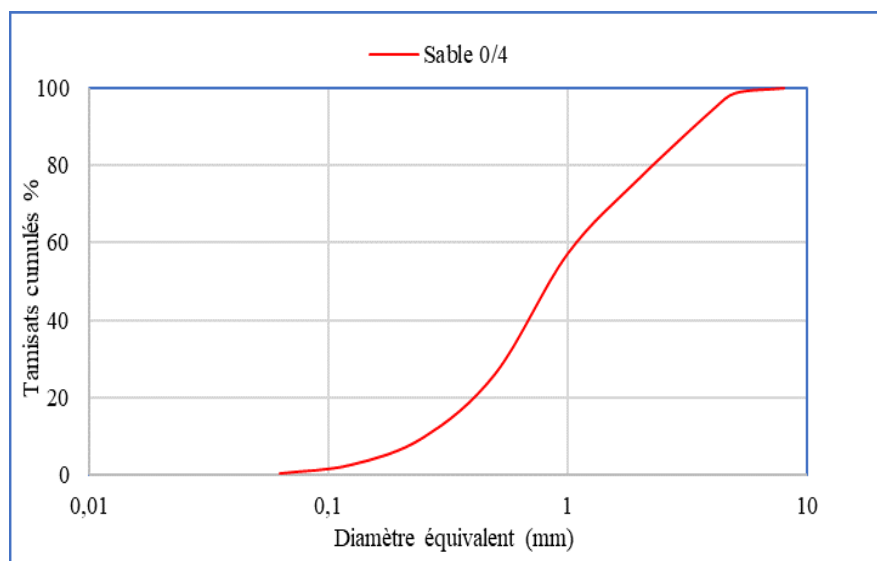


Figure I.1. Courbe granulométrique du sable

I.2.3. Additions minérales

Nous avons utilisé dans notre étude deux types d'additions : la vase et les cendres volantes. Les résultats obtenus par la technique de granulométrie laser de ces additions sont présentés par la figure I.2.

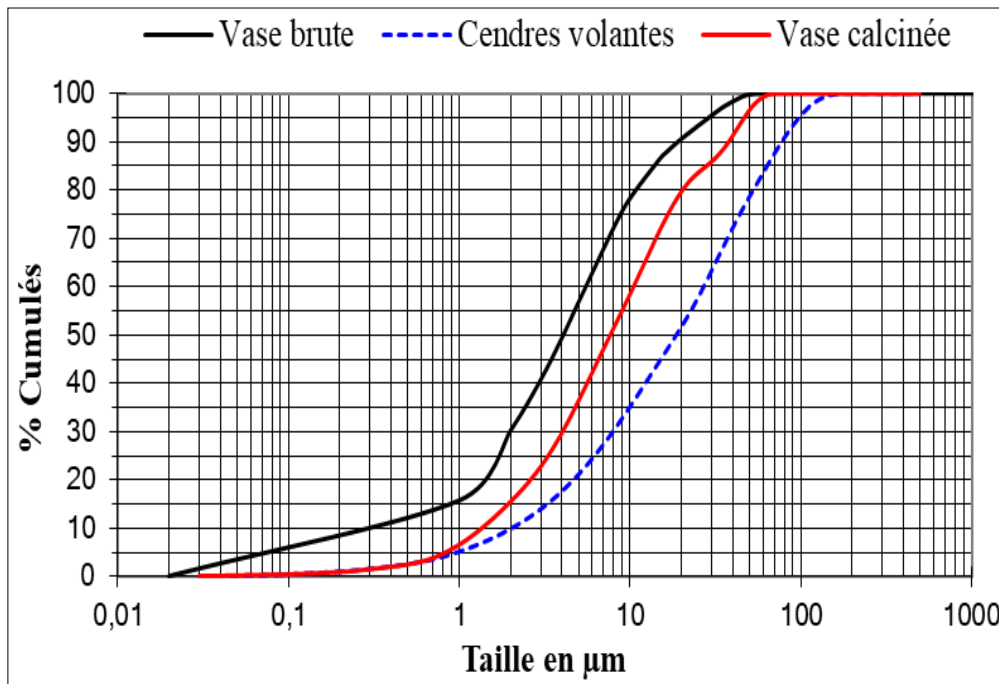


Figure I.2. Granulométrie laser de la vase brute, calcinée et des cendres volantes

L'analyse granulométrique au laser a été réalisée à l'aide du granulomètre CILAS 1180. Les échantillons ont également été soumis à une analyse humide. La distribution granulaire des grains de la vase brute et calcinée montrait une proportion plus élevée de particules fines par rapport aux cendres volantes. On peut clairement noter que la proportion de 95% des particules de la vase calcinée était inférieure à 50 microns comparée à 75% pour les cendres volantes, ce qui confirme la grande finesse de la vase traitée par calcination.

I.2.3.1. Vase

La vase utilisée dans la formulation du mortier de béton autoplaçant équivalent a été prélevée du barrage de Chorfa II situé au niveau de la wilaya de Mascara dans l'ouest Algérien.

Des analyses portant sur l'identification de la vase brute ont été menées par MEB et EDS (figure I.3).

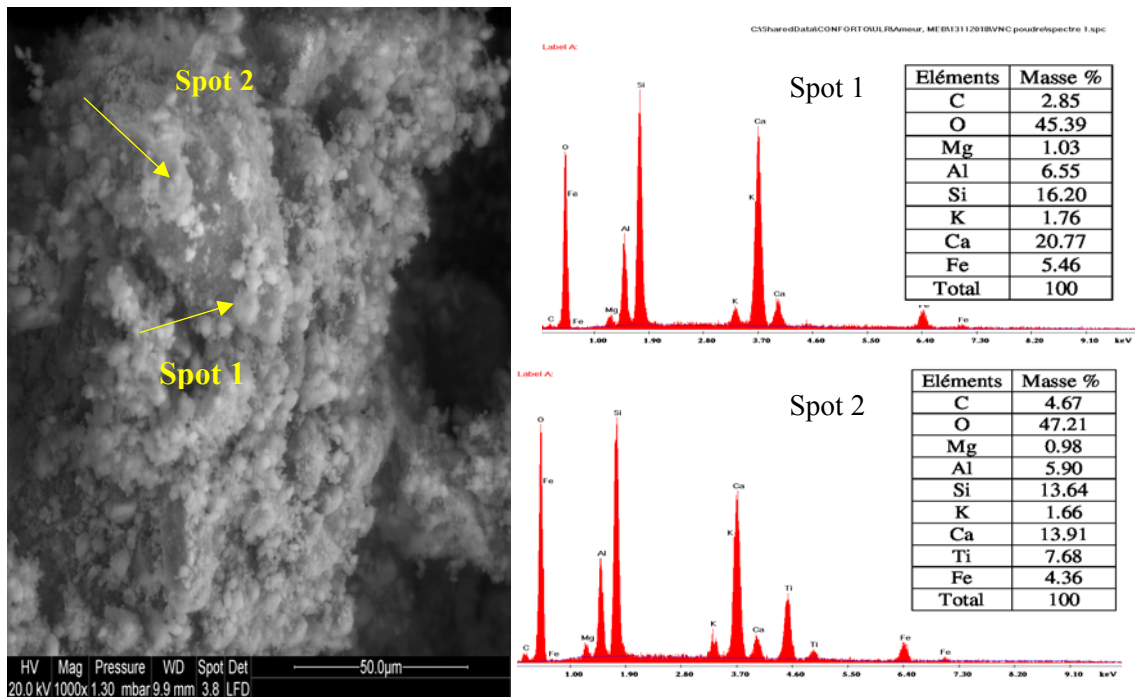


Figure I.3. Analyse MEB et EDS de la vase brute, grossissement 1000×

Cet échantillon se présente sous forme de très petits grains denses. L'analyse chimique de ces particules (spot1 et spot 2) révèle la présence de silicium, d'oxygène et de calcium en grande partie ainsi que la présence d'autres éléments (Al, Mg, Na, K, Ti, Fe.).

L'analyse thermogravimétrique effectuée sur la vase brute est donnée par la figure I.4.

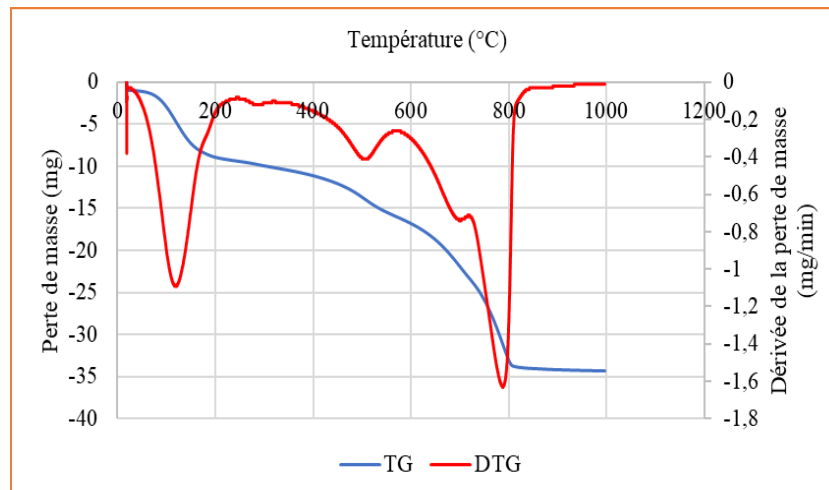


Figure I.4. Analyse thermogravimétrique de la vase brute

Elle permet d'identifier les principaux minéraux par leurs pertes de poids, départ des hydroxydes OH^- de liaison et du CO_2 . Un échantillon finement broyé est porté de la température ambiante à 1000°C à une vitesse relativement lente (10°C/minute), afin de suivre

les phénomènes de pertes de masses. On note une perte de poids quasi linéaire jusqu'à 150°C correspondant au départ de l'eau libre, une petite variation entre 150°C et 410°C correspond à la perte d'eau de la gibbsite, une perte considérable entre 410°C et 670°C correspondant à l'élimination de l'eau de constitution de la Kaolinite et une chute quasi linéaire au-delà de 670°C correspondant au départ de CO₂ des carbonates.

La vase prélevée a été séchée en étuve à 50°C, broyée et tamisée à 80µm, elle a subi un traitement thermique par calcination et la vitesse de cuisson a été réglée à 5 degrés par minute, la température de cuisson (750 °C) a été maintenue constante pendant 5 heures [2]. Le produit ainsi obtenu (vase calcinée) a été conservé à l'abri de l'air et de l'humidité [2]. La démarche expérimentale pour le suivi de la fabrication de la vase calcinée est schématisée sur les figures I.5 et I.6. Les caractéristiques physiques et chimiques de cette vase sont données dans les tableaux I.3 et I.4.



Figure I.5. a) séchage à 50°C b) concassage et broyage c) tamisage à 80µm d) calcination à 750°C pendant 5 heures



Figure I.6. a) vase brute b) vase séchée c) vase broyée d) vase tamisée e) vase calcinée

Tableau I.3. Caractéristiques physiques de la vase calcinée

Essais	Normes utilisées	Résultats obtenus
Surface spécifique (Blaine) (cm ² /g)	EN196-6	8310
Masse volumique (g/cm ³)	NFP18-555	2.65
Indice pouzzolanique i ₂₈	NFP 18-506	0.93

Tableau I.4. La composition chimique de la vase calcinée

Oxydes	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Cl	K ₂ O	SO ₃
Teneur (%)	48.39	17.03	6.82	15.63	2.85	0.066	2.3	0.23

La figure I.7 montre l'analyse par diffractions aux rayons X de la vase brute et traitée par calcination à 750°C. L'analyse DRX de la vase brute, montre l'existence de minéraux tels que le quartz (SiO₂), la Kaolinite (Al₂Si₂O₅(OH)₄), Magnesium Silicate, Amesite. La Kaolinite après calcination entre 400 et 800 °C se transforme en métakaolin [3]. En effet, le diffractogramme des rayons X de la vase calcinée à 750 °C montre surtout la disparition des pics de la Kaolinite. Le faible degré de cristallinité du produit de cette calcination, en l'occurrence le métakaolin rend la silice et l'alumine potentiellement réactives, l'activité pouzzolanique est liée à cette particularité [4]. Donc la calcination à 750°C pendant 5 heures devrait nous assurer la réactivité pouzzolanique recherchée [2].

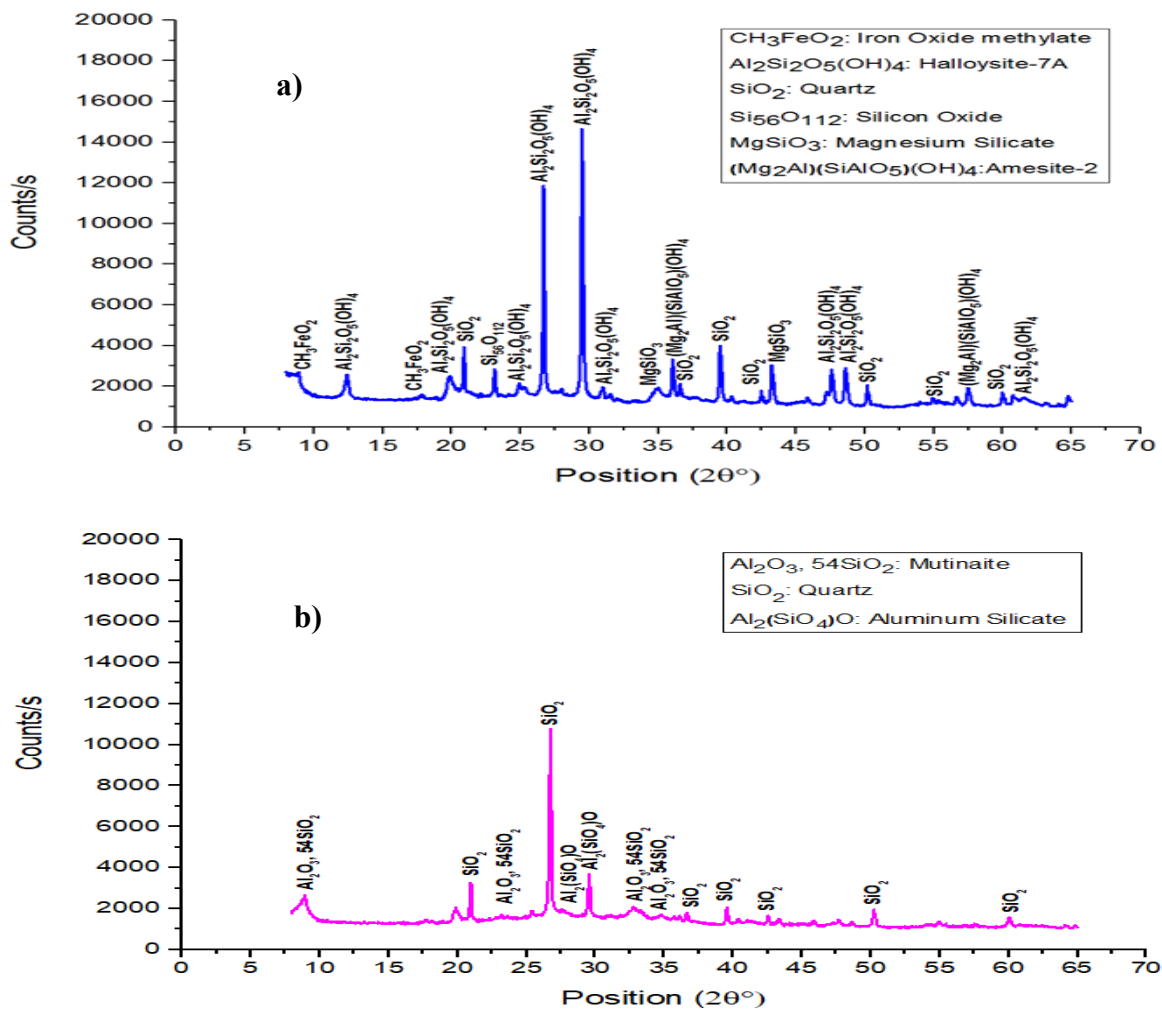


Figure I.7. Diffraction aux rayons X: a) vase brute b) vase calcinée

Des analyses complémentaires portant sur l'identification de la vase calcinée ont été menées par MEB et EDS. Les résultats de la microanalyse illustrent la présence de plusieurs éléments chimiques sous forme de spectres (figures I.8 et I.9). Les images données par le MEB révèlent une forme des grains de quartz issus de vase calcinée irrégulière, très fins, poreux, leurs surfaces sont rugueuses.

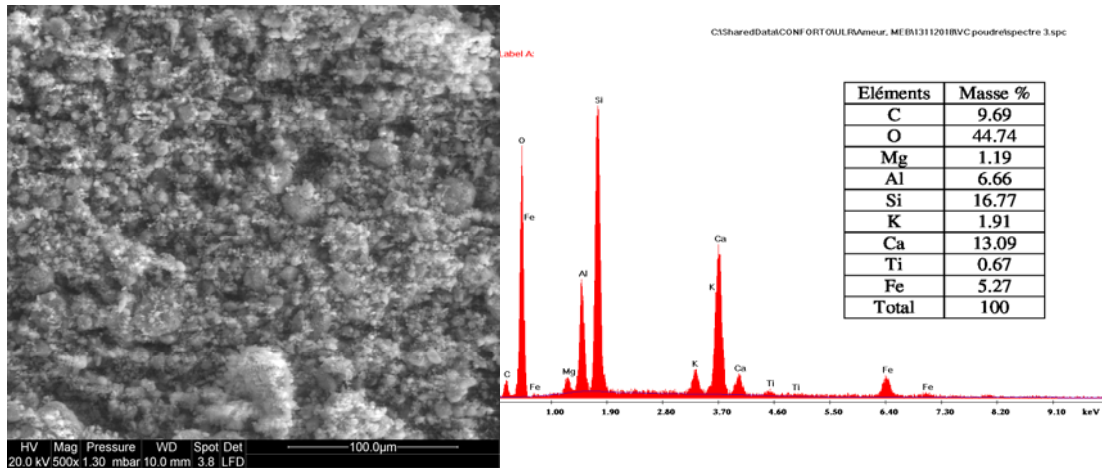


Figure I.8. Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques EDS de la vase calcinée d'une surface $300 \times 300 \mu^2$, grossissement $500\times$,

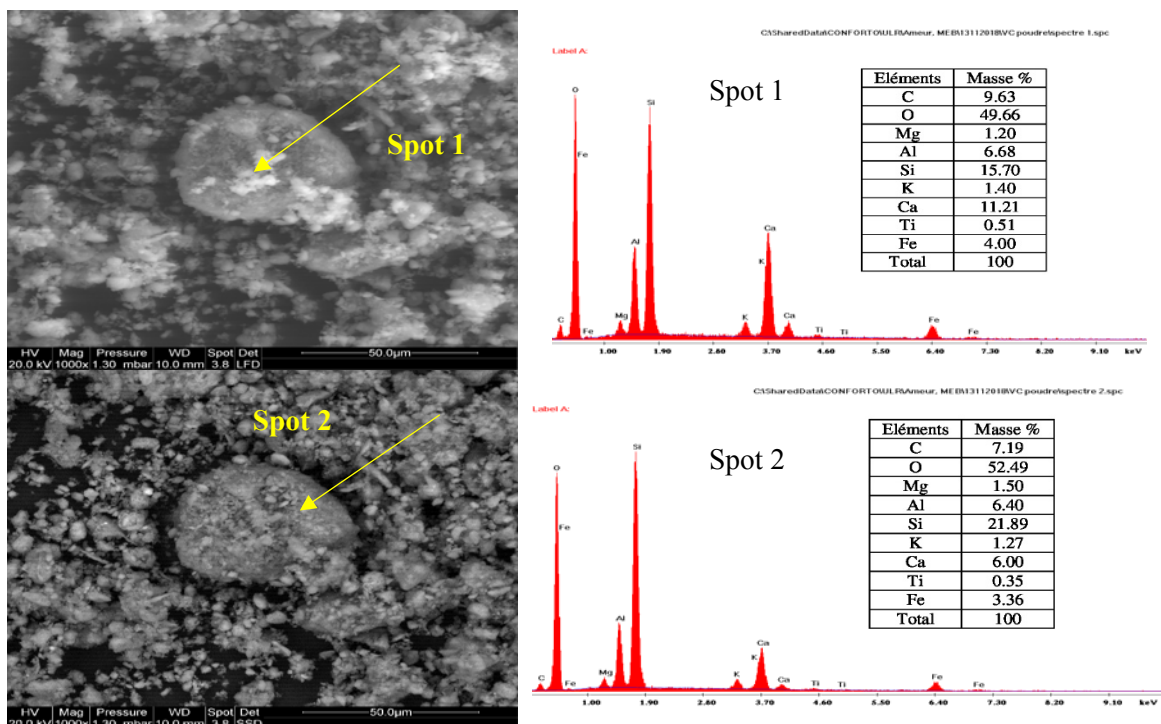


Figure I.9. Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques de la vase calcinée (les spots), grossissement $1000\times$

L'analyse chimique de ces particules révèle la présence de Silicium et d'Oxygène en grande partie ainsi que la présence d'autres éléments (Al, Mg, Na, K, Ti, Fe.).

L'analyse thermogravimétrique effectuée sur la vase calcinée est donnée par la figure I.10.

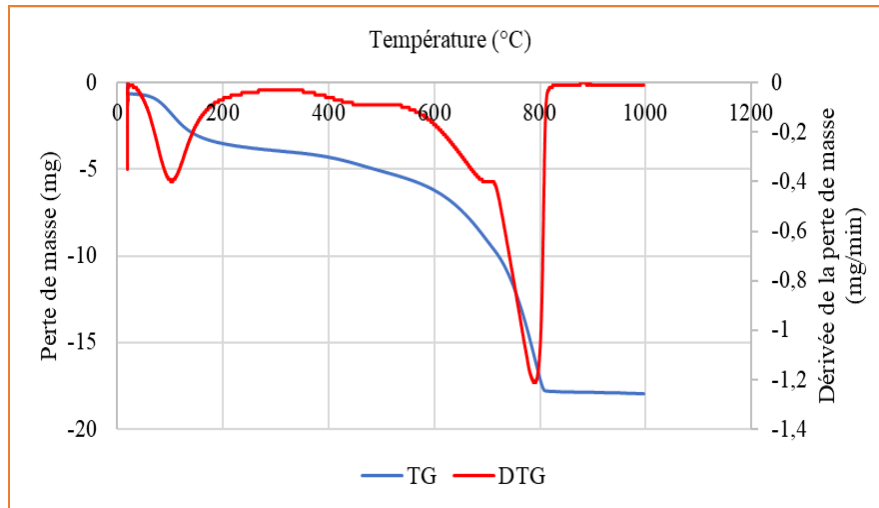


Figure I.10. Analyse thermogravimétrique de la vase calcinée

D'après la figure I.10, on remarque une perte de masse quasi linéaire jusqu'à 100°C correspondant au départ de l'eau libre, une petite variation entre 100°C et 400°C correspond à la perte d'eau de la gibbsite $Al(OH)_3$, une moindre perte entre 400°C et 650°C par rapport à la vase brute correspondant à l'élimination de l'eau de constitution de la Kaolinite et une chute quasi linéaire au-delà de 700°C correspondant au départ de CO_2 des carbonates. Ces résultats ont été confirmés par les analyses de DRX.

I.2.3.2. Cendres volantes

Les cendres volantes utilisées dans la formulation du mortier de béton autoplaçant équivalent provenaient de la centrale thermique EDF à Cordemais (France). Il s'agissait d'une cendre volante silico-alumineuse de « classe F », sous la forme d'une fine poudre de couleur grise. Les caractéristiques physiques et chimiques par fluorescence X de ces cendres volantes sont résumées dans les tableaux I.5 et I.6 respectivement.

Tableau I.5. Caractéristiques physiques des cendres volantes [1]

Essais	Normes utilisées	Résultats obtenus
Surface spécifique (Blaine) (cm^2/g)	EN196-6	4334
Masse volumique (g/cm^3)	NFP18-555	2.05
Indice pouzzolanique i_{28}	NFP 18-506	0.79

Tableau I.6. Composition chimique des cendres volantes [1]

Oxydes	SiO ₂	CaCO ₃	Ca O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	SO ₃	HCL
Teneur (%)	49.6	/	3.0	17	23.8	1.3	0.6	0.1	/

Les analyses MEB-EDS de la poudre des cendres volantes est représentée sur les figures I.11 et I.12.

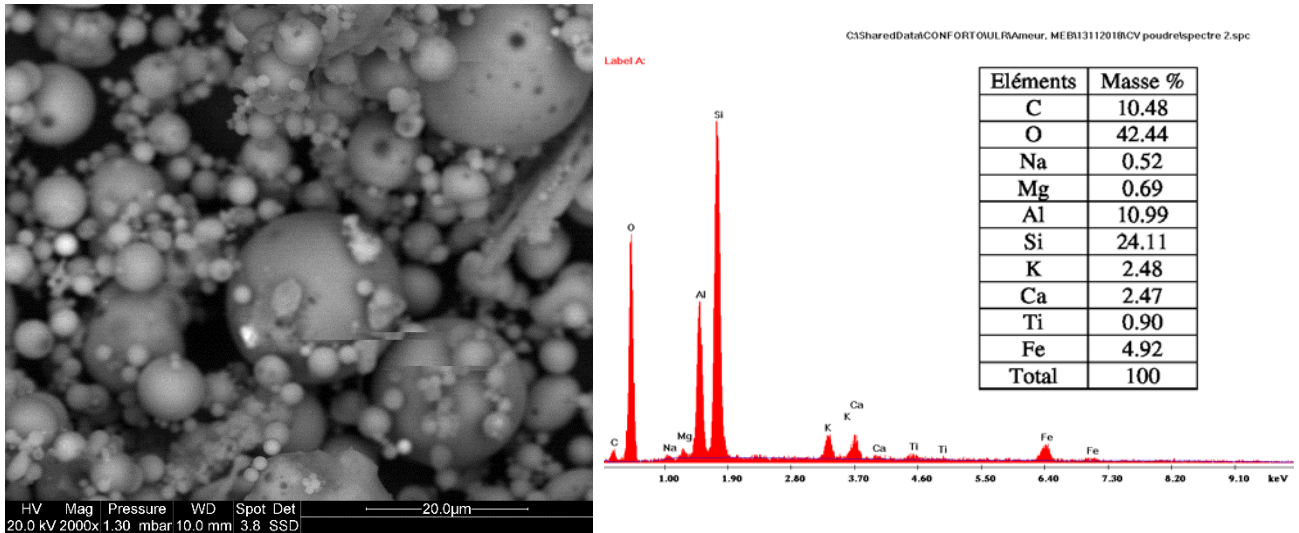


Figure I.11. Analyse MEB et EDS des cendres volantes d'une surface 70x60 μ^2 , grossissement 2000×

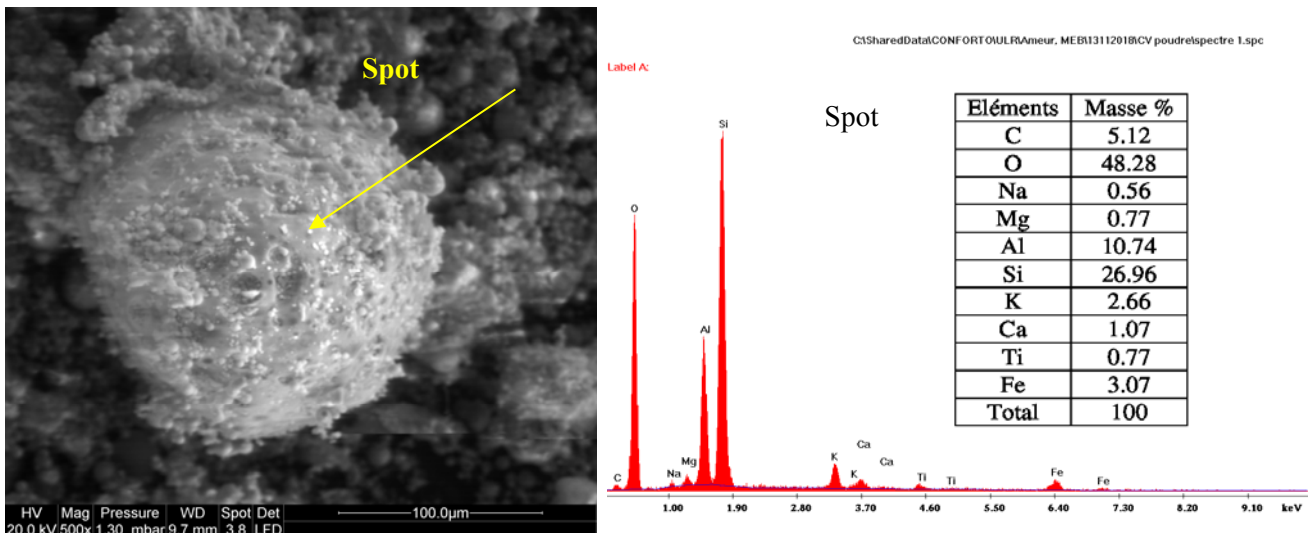


Figure I.12. Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques EDS des cendres volantes (le spot), grossissement 500×

L'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) de la poudre de cendres volantes révèle un matériau dont les particules ont une forme sphérique. Les cendres volantes sont

composées principalement de Silicium, d'Oxygène en grande partie ainsi que la présence d'autres éléments (Al, Mg, Na, K, Mn, Ti...).

L'analyse thermogravimétrique effectuée sur les cendres volantes est donnée par la figure I.13.

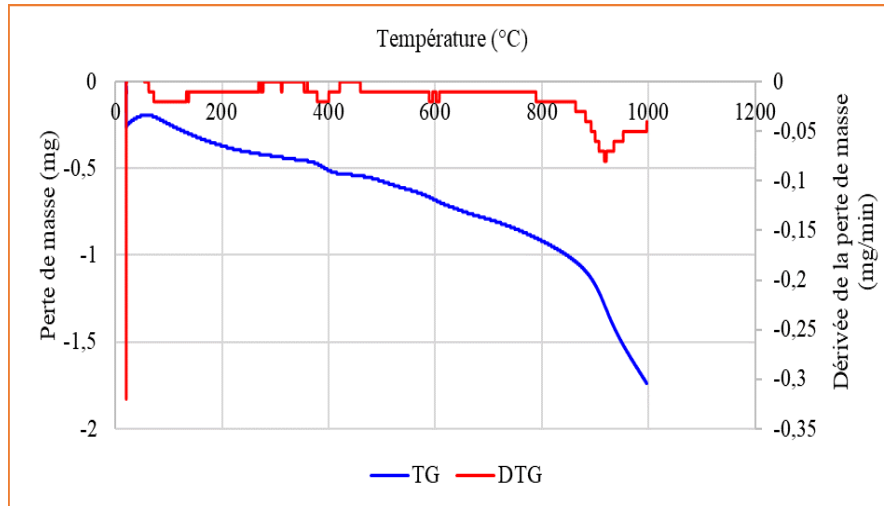


Figure I.13. Analyse thermogravimétrique des cendres volantes (laboratoire LaSic, université de La Rochelle)

Pour cette analyse aucune perte de masse n'est enregistrée dans la plage de décomposition des hydrates et de la calcite.

I.2.4. Adjuvant

Les adjuvants permettent d'obtenir une grande fluidité et une parfaite homogénéité nécessaire à l'obtention d'un MBAPE.

Un seul type d'adjuvant a été employé durant notre étude, un superplastifiant SIKA VISCOCRETE TEMPO 11, qui est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique, conforme à la norme NF EN 934-2. Sa densité est de $1,060 \pm 0.020$, sa teneur en ions chlorures est inférieure à 0,1% et il possède entre $30.0\% \pm 1.5\%$ d'extraits secs. Son dosage peut varier de 0,1 à 5% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Il se caractérise par sa grande durée de rhéologie et de sa résistance à la ségrégation.

I.3. FORMULATIONS DES MBAPE UTILISÉES

Les formulations des mortiers de béton autoplaçant équivalent sont déterminées à partir de deux compositions de béton autoplaçant contenant des cendres volantes (BAP2 avec $E/L=0.39$ et BAP5 avec $E/L= 0.47$) formulées par Mesbah [5].

Six formulations ont été étudiées, couvrant deux différents rapports E/L (0.39 et 0.47) et trois types de mortier, à savoir un MBAPE avec vase calcinée (MBAPEVC), un MBAPE avec cendres volantes (MBAPECV) et un mortier sans addition choisi comme mortier de référence ou témoin (MBAPET).

Les trois mélanges de mortier correspondant à chaque rapport E/L ont été formulés à partir des mêmes constituants. Le dosage en superplastifiant est déterminé de manière expérimentale à partir d'essais sur mortier frais afin d'obtenir un étalement de $20\pm 1\text{cm}$ [6] pour tous les MBAPE.

Les mélanges avec additions ont été préparés avec un dosage de 22% de vase calcinée ou des cendres volantes en substitution partielle à la masse du ciment. Les dosages des constituants sont portés dans le tableau I.7.

Tableau I.7. Composition des MBAPE

Désignation MBAPE	E/L	Ciment (g/l)	Vase (g/l)	Cendres volantes (g/l)	Eau (g/l)	Adjuvant (g/l)	Sable (0/4) (g/l)
MBAPET 0.39	0.39	641.59	/	/	250	3	1400
MBAPEVC 0.39	0.39	493	141	/	247	7.5	1385
MBAPECV 0.39	0.39	488	/	139	244	2.5	1367
MBAPET 0.47	0.47	649	/	/	304	1.5	1277
MBAPEVC 0.47	0.47	500	143	/	299	4.5	1266
MBAPECV 0.47	0.47	494	/	141	295	1.5	1250

Avec :

MBAPET : mortier de béton autoplaçant équivalent témoin

MBAPEVC : mortier de béton autoplaçant équivalent à base de vase calcinée

MBAPECV : mortier de béton autoplaçant équivalent à base des cendres volantes

Les mortiers autoplaçants étudiés sont réalisés conformément à la norme EN 196-1, ils ont été mélangés pendant 3 minutes et 30 secondes au lieu de 4 minutes pour éviter le ressuage et la

ségrégation dans un malaxeur à mortier de capacité 5 litres. L'ordre d'introduction des constituants et les séquences de malaxage des MBAPE sont présentés sur le tableau I.8.

Tableau I.8. Séquence de malaxage des MBAPE étudiés

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Introduction de l'addition		Introduction du sable	Raclage		Introduction de l'adjuvant
Durée				30s	30s	15s	1mn 15s	60s
État du malaxeur	Arrêt			Vitesse lente	Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide

La séquence du malaxage a été la suivante :

- Malaxage des constituants (eau, ciment et fine) pendant 30 s (vitesse lente),
- Introduction du sable et continuer le malaxage pendant 30 s (vitesse rapide),
- Introduction des adjuvants et malaxage pendant 60 s (vitesse rapide).

Les mortiers autoplaçants n'ont subi aucune vibration, les moules utilisées pour la confection des éprouvettes sont des moules prismatiques (40 x 40 x 160 mm³).

I.4. FORMULATIONS DES PÂTES DE LIANT ÉTUDIÉES

Dans l'élaboration des formulations des pâtes de liant, le ciment a été remplacé partiellement par 22% de vase calcinée ou 22% des cendres volantes. La composition de ces pâtes correspond à celle de la pâte de liant dans les MBAPE sans l'utilisation de superplastifiant. Au total, six pâtes ont été confectionnés avec les deux rapports E/L= 0.39 et E/L= 0.47, leurs compositions sont données dans le tableau I.9.

Tableau I.9. Composition des pâtes de liant étudiées

Désignation pâtes	E/L	Ciment (g/l)	Vase (g/l)	Cendres volantes (g/l)	Eau (g/l)
PT0.39	0.39	641.59	/	/	250
PVC0.39	0.39	493	141	/	247
PCV0.39	0.39	488	/	139	244
PT0.47	0.47	649	/	/	304
PVC0.47	0.47	500	143	/	299
PCV0.47	0.47	494	/	141	295

Avec :

PT : Pâte de liant témoin

PVC : Pâte de liant à base de vase calcinée

PCV : Pâte de liant à base des cendres volantes

I.5. CONCLUSION

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

Suite aux essais préliminaires d'identification des sédiments issus du barrage Chorfa II et traités par calcination, il a été constaté que cette vase est doublement plus fine que le ciment, de plus les images réalisées au MEB-EDS révèlent une structure poreuse des grains de vase, ce qui se traduit principalement par une grande demande en eau pour l'hydratation [7], raison pour laquelle, les essais de l'influence de cette vase sur le retrait sont indispensables.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **SIAD H.**, « Influence du type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants ». Thèse de doctorat, INSA de Rennes, France, 2010.
- [2] **SEMCHA A.**, « Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug ». Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2006.
- [3] **SAIDAT F.**, « Activation chimique du Métakaolin dans une matrice cimentaire ». Thèse de doctorat en génie civil, Université de Toulouse 3, 2013.
- [4] **ANGER B.**, « Caractérisation des sédiments fins des retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière ». Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, 2014.
- [5] **MESBAH H., LARABA A., YAHIA A.**, « Flowability and Stability Performance of Self-Consolidating Concrete in Full-Scale Beam ». 8th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete- SCC2016, May 2016, Washington, DC, United States. Conference Proceedings (665-674), <http://www.scc2016.com>.
- [6] **FNAR C.**, « Specification and guidelines for self-compacting concrete ». Feb. 2002, pp 29–35. Free pdf copy downloadable from <http://www.efnarc.org>.
- [7] **BELGUESMIA K., BELAS BELARIBI N., AMIRI O., LEKLOU N., BELARIBI O.**, « Influence of treated sediment substitution percentage on workability », strength and porosity of SCC. *J. Mater. Eng. Struc.* 5, 47–55, 2018.

CHAPITRE II.

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

CHAPITRE II. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

II.1. INTRODUCTION

Cette étude de recherche vise à apporter une contribution à la valorisation de sédiments de dragage du barrage de Chorfa II (Algérie) en tant qu'addition minérale dans la composition de MBAPE.

Il s'agit de comparer l'influence de la nature des ajouts minéraux (sédiment traité et cendres volantes) sur les caractéristiques physico-mécaniques et sur le retrait de ces mortiers autoplaçants à court (28 jours), à moyen (90 jours) et à long terme (350 jours).

Six formulations ont été étudiées dans ce travail de recherche avec un seul pourcentage d'addition minérale (22%) où le rapport E/L change ($E/L=0.47$ et $E/L=0.39$).

Le MBAPE est caractérisé par un essai spécifique à l'état frais (test d'étalement). À l'état durci, divers essais relatifs aux domaines mécaniques, physiques et différés ont été réalisés afin de mesurer : la résistance à la compression et à la flexion, le retrait plastique, le retrait libre (total, endogène et de dessiccation) et l'âge et la largeur de la fissuration due au retrait empêché.

En ce qui concerne les essais des propriétés de transport, nous avons réalisé les essais suivants : l'absorption capillaire, la porosité accessible à l'eau.

En parallèle, la teneur en eau liée et libre, des analyses DRX (diffractométrie de rayons X), des observations au MEB (microscopie électronique à balayage) et EDS (la spectrométrie X par dispersion en énergie) et des analyses thermogravimétriques ATG ont été effectuées pour caractériser la microstructure et apporter ainsi des éléments explicatifs aux phénomènes observés.

Ce chapitre a pour objectif de présenter l'ensemble des techniques expérimentales qui ont servi de support à cette thèse.

Les mélanges frais et durcis pour les pâtes de liant et les mortiers font l'objet de caractérisations et des essais présentés sur deux figures II.1 et II.2 respectivement, résumant le travail expérimental mené dans cette étude :

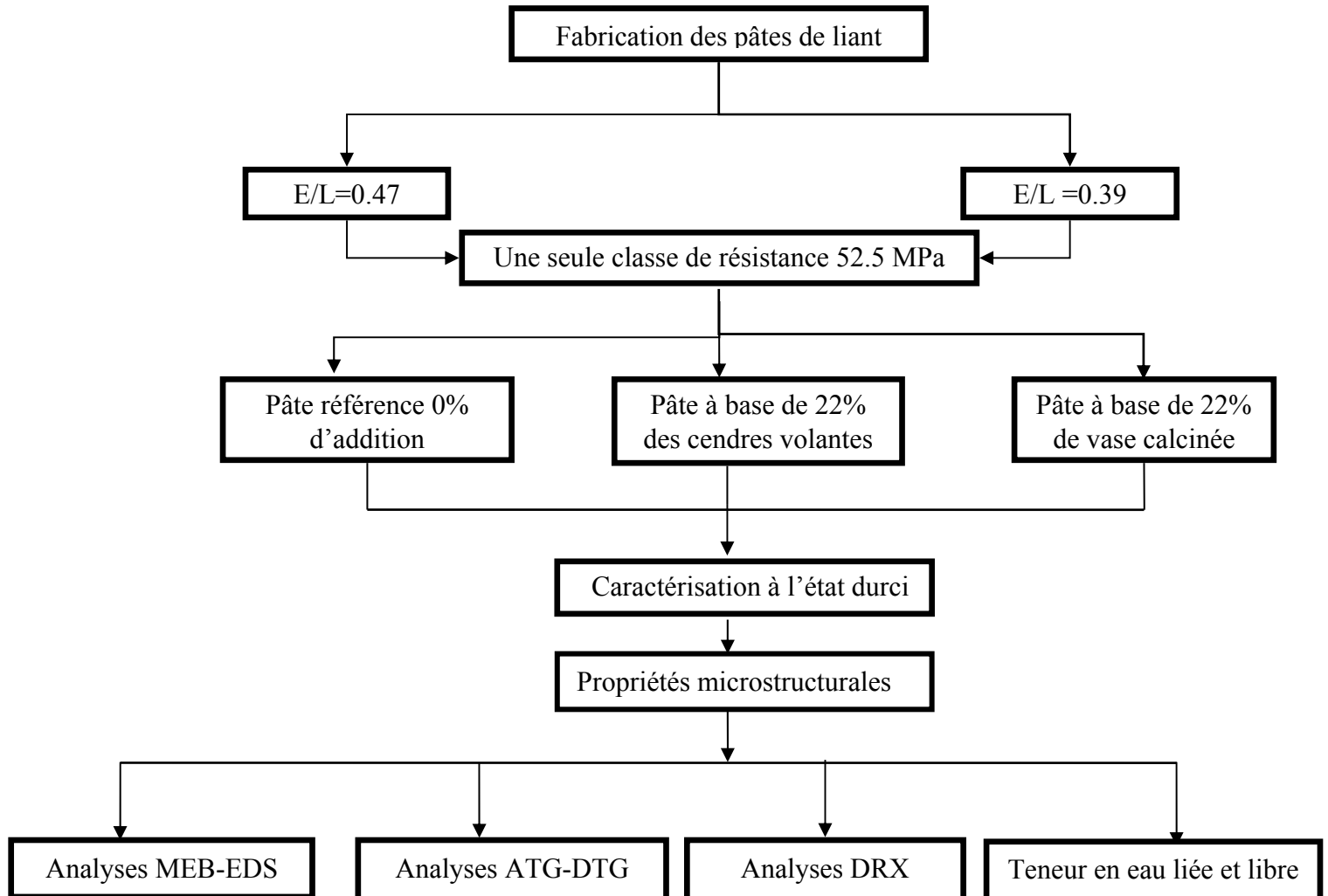


Figure II.1. Représentation schématisée des essais des pâtes de liant

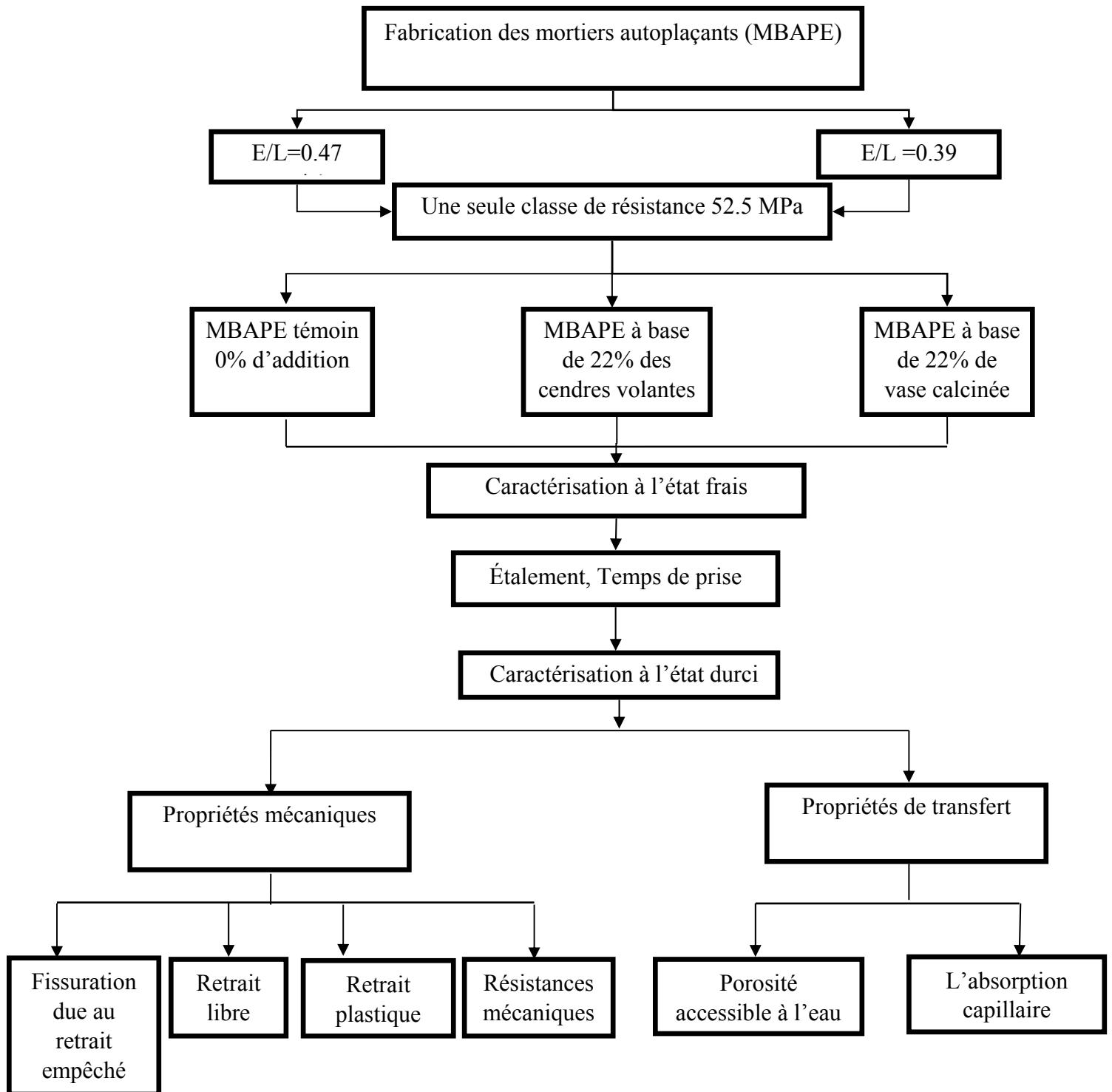


Figure II.2. Représentation schématique des essais des MBAPE

II.2. ESSAIS DE CARACTÉRISATION DE MBAPE À L'ÉTAT FRAIS

Le comportement du mortier à l'état frais a été vérifié par les essais suivants : étalement au cône et la mesure des temps de début et fin de prise.

II.2.1. Essai d'étalement (Slump flow)

En tant que partie intégrante d'un BAP, les mortiers autoplacants (MBAPE) peuvent servir de base à la conception du béton depuis la mesure des propriétés rhéologiques des BAP [1]. Les MBAPE ont fait l'objet de caractérisation à l'état frais par l'essai d'étalement au cône (figure II.3), conformément aux recommandations de EFN-Comité de l'ARC (fédération européenne des spécialistes produits chimiques de construction et systèmes à béton) [2]. La technique de mesure permettant de caractériser les propriétés rhéologiques du MBAPE, les mesures sont effectuées après soulèvement du cône, un seul paramètre est mesuré lors de l'essai, le diamètre final atteint par la galette d'étalement (figure II.3). Dans la production de MBAPE, le processus de mélange a été maintenu constant pour fournir la même homogénéité et la même uniformité à tous les mélanges [1]. La mesure de l'étalement est effectuée selon deux diamètres orthogonaux, la valeur de l'étalement est la moyenne de ces valeurs arrondie au centimètre près. Tous les mélanges ont été conçus pour donner un diamètre d'étalement de 20 ± 1 cm au lieu de 25 ± 1 cm afin d'éviter le ressuage et la ségrégation [2].



Figure II.3. Essai d'étalement des MBAPE étudiés

II.2.2. Temps de prise

Les mesures du temps de début et fin de prise ont été effectuées sur des MBAPE en utilisant un appareil VICAT automatique classique (figure II.4), conformément à la norme EN 196-3.

Ce nouvel appareil a été totalement reconçu, comme pour les plus anciennes générations, la procédure d'essai est inchangée, une aiguille (ou une sonde) tombe librement sur un échantillon de ciment à des intervalles de temps réguliers et en des positions fixes. La profondeur de pénétration est mesurée avec un capteur de résolution 0.1 mm. Lors du processus de durcissement, cette profondeur décroît et les mesures sont effectuées selon les prescriptions définies dans les normes pour les temps de début et fin de prise, puis mémorisées.



Figure II.4. Appareil VICAT automatique classique

II.3. ESSAIS DE CARACTÉRISATION MICROSTRUCTURALE DES PÂTES DE LIANT ÉTUDIÉES

Nous avons cherché à caractériser le suivi de l'évolution de l'eau liée et libre dans les pâtes de liant. Plusieurs essais de caractérisation microscopique incluant l'analyse par diffractions aux rayons X, l'analyse thermogravimétrique et l'observation microscopique, ont été réalisés pendant cette campagne expérimentale afin d'approfondir notre compréhension et avoir des informations complémentaires sur la microstructure.

II.3.1. Mesure thermique de la teneur en eau libre et liée

L'objectif principal de l'analyse thermique est de suivre l'évolution de la teneur en eau liée et libre des pâtes de liant (figure II.5). Leurs compositions sont données dans le tableau II.10. En effet, l'eau liée peut être considérée comme un indicateur important et fiable de l'avancement

de l'hydratation et de la modification de la microstructure [3]. Un échantillon concassé avec une granulométrie inférieure à 2.5 mm (environ 4g) est mis dans un creuset taré. Soit M_i , la masse initiale de la pâte. Le creuset est introduit dans l'étuve à 80°C pour sécher l'échantillon. La pesée est réalisée après avoir laissé refroidir le creuset contenant la pâte pendant 15min dans un dessiccateur contenant du gel de silice. Soit $M_{80^\circ\text{C}}$ la masse sèche finale [4].

La perte relative de masse correspondant à l'eau libre est alors égale à :

$$\Delta M_{\text{eau libre}} = (M_i - M_{80^\circ\text{C}}) / M_i \quad [4]. \quad \text{II.1}$$

On introduit alors le creuset contenant les broyats secs dans l'étuve à 105°C, après 2 heures, le creuset est laissé à refroidir pendant 15 min dans un dessiccateur contenant du gel de silice puis il est pesé. L'opération est répétée dans le four dont la température a été préalablement réglée à 400°C et aussi à 600°C pendant 1 heure.

La perte relative de masse à 600°C est égale à :

$$\Delta M_{\text{eau d'hydratation}} = (M_{80^\circ\text{C}} - M_{600^\circ\text{C}}) / M_{80^\circ\text{C}} \quad [4]. \quad \text{II.2}$$

L'opération est répétée dans le four dont la température a été préalablement réglée à 1000°C.

La perte relative de masse entre 600°C et 1000°C est égale à :

$$\Delta M_{\text{CO}_2 \text{ des carbonates}} = (M_{600^\circ\text{C}} - M_{1000^\circ\text{C}}) / M_{80^\circ\text{C}} \quad [4]. \quad \text{II.3}$$

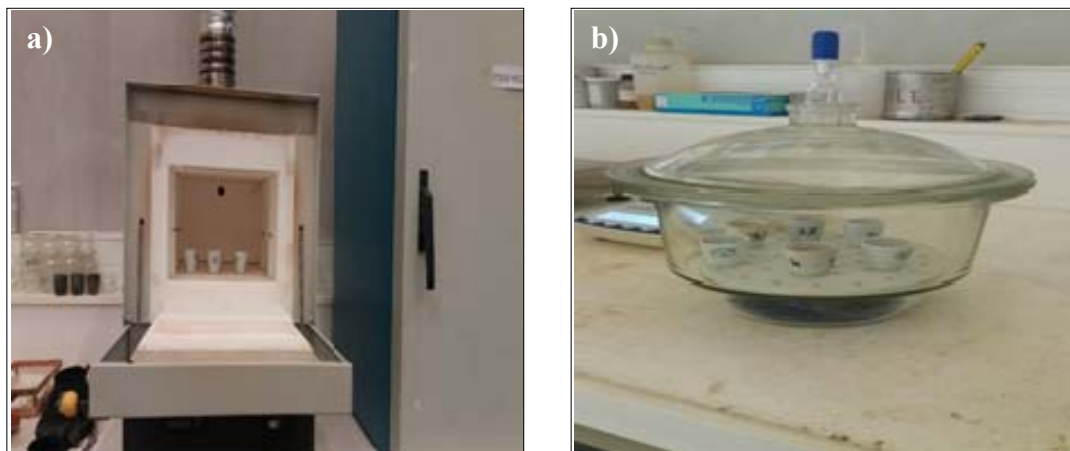


Figure II.5. a) Four (Température maximale 3000° C) b) Dessiccateur

II.3.2. Analyse par DRX

La diffraction des rayons X est la méthode la plus couramment utilisée pour se renseigner sur la composition minéralogique d'un matériau.

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 [5]. L'instrument utilisé est un diffractomètre (figure II.6). 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° [6]. 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 [7].

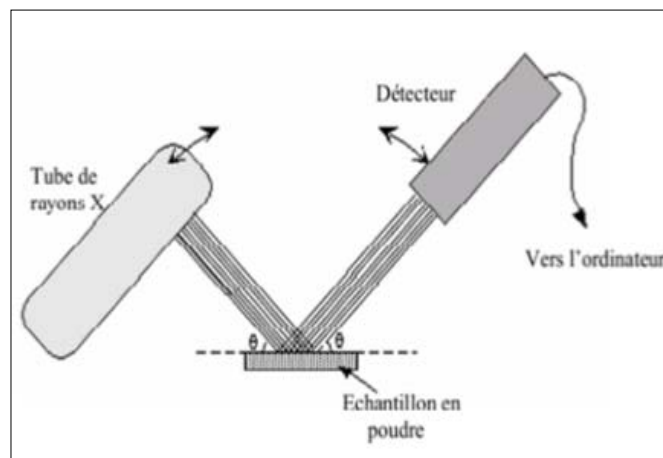


Figure II.6. Schéma d'un diffractomètre [6]

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 [6].

Les analyses DRX ont été effectuées sur des pâtes de liant âgées de 28 jours de cure sèche et broyées (environ 13 g), elles ont été réalisées au laboratoire de la société Lafarge à Sig (ouest algérien), les diagrammes sont réalisés à l'aide d'un appareil « D4 ENDEAVOR » (figure II.7). L'objectif de ces tests est d'identifier les phases cristallines des formulations étudiées et nous renseigner sur le développement de la microstructure.



Figure II.7. a) Broyeur b) Diffractomètre de marque D4 ENDEAVOR

II.3.3. Analyse thermogravimétrique ATG

L'objectif de cet essai est de déterminer les teneurs de certaines phases solides caractéristiques de nos pâtes de liant. Il est ainsi possible d'évaluer la teneur en Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui est directement liée au degré d'hydratation du ciment [4]. Ce mode opératoire décrit le déroulement d'une analyse thermique simultanée appliquée à des échantillons de pâtes de liant âgées de 10 mois, qui comprend une analyse thermogravimétrique ATG.

Le principe de l'ATG est de mesurer la variation de masse d'un échantillon soumis à des variations de température dans une atmosphère contrôlée. La perte de masse est suivie par une mesure continue à l'aide d'une balance. L'échantillon à analyser est placé dans un four, il est alors soumis à une montée en température [8].

La thermogravimétrie et sa dérivée, notée DTG, quantifient les diverses pertes ou reprises de masse observées au cours de l'essai. La courbe DTG permet de mieux calculer les variations de masse en précisant avec netteté les températures de début et de fin de réaction donnant naissance aux divers accidents enregistrés sur la courbe ATG [4].

La thermogravimétrie permet de déterminer :

- La teneur en eau provenant de la déshydratation :
 - Des C-S-H et de l'ettringite,
 - De la brucite,
 - De la portlandite,

- De l'eau de constitution de divers minéraux rencontrés soit dans les gravillons soit dans les sables,
- La teneur en gaz carbonique CO_2 , provenant de la décomposition
- De la dolomite,
- De la calcite des granulats,
- De la calcite provenant de la carbonatation du liant,
- La perte au feu totale de l'échantillon de béton [4]

L'appareil utilisé est de marque SETARAM de type SETSYS Evolution 16/18 du laboratoire LaSIE à l'université de La Rochelle. Il se compose d'une enceinte étanche permettant de contrôler l'atmosphère de l'échantillon, d'un four permettant de gérer la température, d'un module de pesée (microbalance), d'un thermocouple pour mesurer la température et d'un ordinateur permettant de contrôler l'ensemble et d'enregistrer les données (figure II.8) [9].

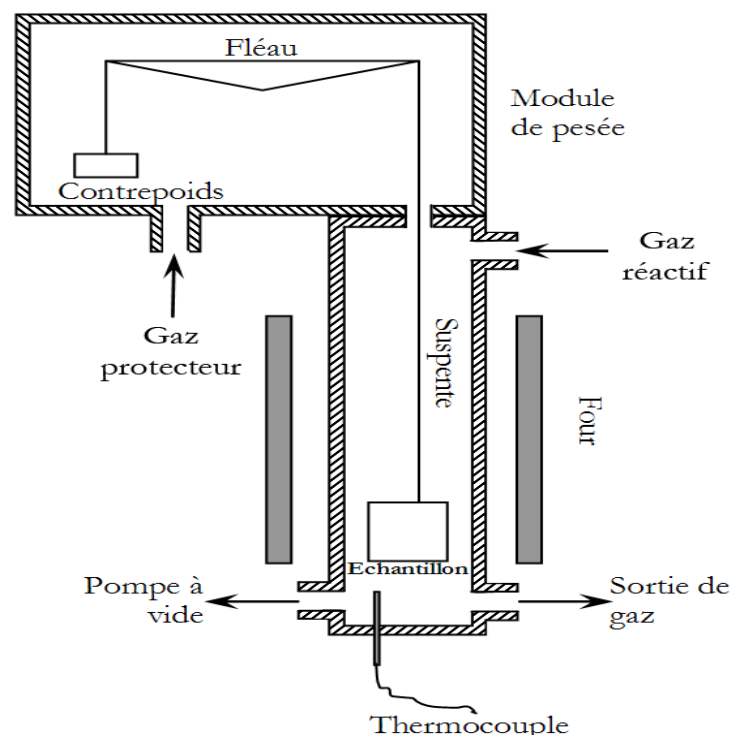


Figure II.8. Schéma d'un appareil d'ATG (type Setaram-SETSYS Evolution 16/18) [9]

La microbalance est entourée d'une atmosphère inerte, dans notre cas constitué d'argon. Ce gaz constitue un couvercle empêchant le gaz réactif de pénétrer dans l'enceinte du module de pesée, et le gaz doit être moins dense que le gaz réactif. L'appareil dispose d'un système de

refroidissement à circulation d'eau [9] (figure II.9). Lors du test, la température est augmentée de la température ambiante à une température de 1000°C avec une vitesse de chauffe de 10°C/min qui reste constante tout au long du test.

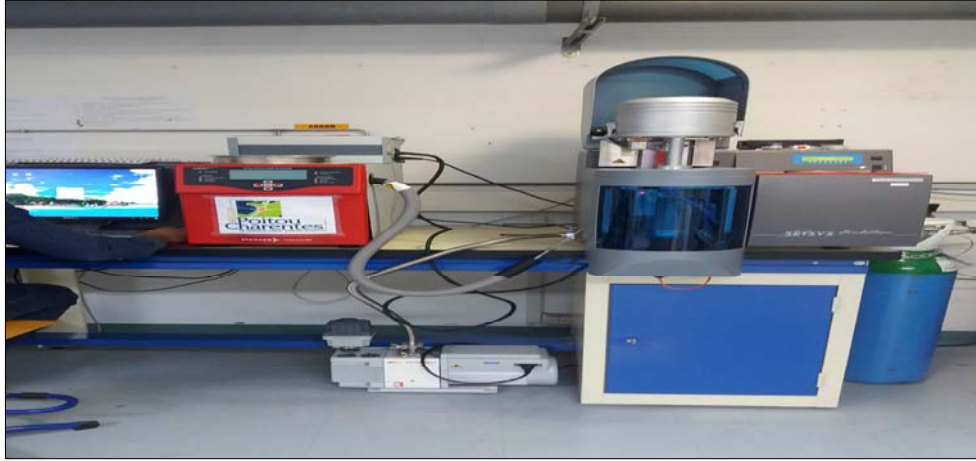


Figure II.9. Appareil d'ATG (type Setaram-SETSIS Evolution 16/18)

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 DTG par rapport au temps, montre la correspondance entre les pertes de masses et celles dérivées (DTG) comme le montre la figure II.10.

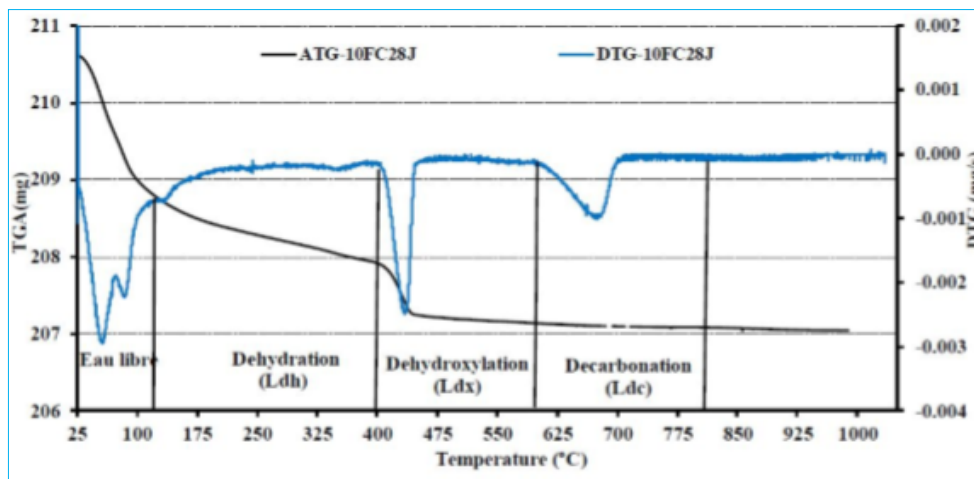


Figure II.10. Exemple des principaux pics DTG pour un mélange à base de ciment et de fines calcaires [10]

À partir de la figure II.10, on distingue trois phases majeures de décomposition d'un échantillon testé :

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

II.3.3.1. Exploitations des thermogrammes

Différents auteurs ont décrit les réactions qui se produisent dans les matériaux cimentaires sous élévation de la température. Bien que les températures de transition de phases varient en fonctions des caractéristiques de l'instrument (vitesse de chauffage, nombre de têtes de mesure, nature du porte échantillon. . .) ou de l'échantillon (compacité, granulométrie, masse) [11], il est possible d'identifier des plages de température caractéristiques des phases des matériaux cimentaires :

- **30-105°C** : évacuation de l'eau libre. L'objectif du prétraitement est d'éliminer une grande partie de cette eau.
- **25-550°C** : deshydroxylation des C-S-H [12]. En revanche, de nombreux auteurs considèrent que la majorité de l'eau liée des C-S-H est évacuée pour des températures inférieures à 550°C. Villain et Platret [13] considèrent qu'au-delà de 430°C toute l'eau des C-S-H est évacuée, et plus récemment, Borges et al [14] considèrent que dès 300°C la quantité d'eau libérée par les C-S-H est négligeable.
- **50-130°C** : décomposition de l'ettringite. Selon certains auteurs, l'ettringite se décompose entre 120 et 130°C [15,16]. En revanche, quand la teneur en alcalins et le ratio $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ augmentent, la température de décomposition est abaissée. Il est rapporté que l'ettringite est susceptible de se décomposer dès 50°C [17,18]. Berger [19] rapporte dans le cas de ciments sulfo-alumineux une décomposition de l'ettringite entre 85 et 130°C.
- **140-170°C** : décomposition du gypse (pic endothermique) [16].
- **180-200°C** : décomposition des phases AFm (monosulfoaluminate de calcium hydraté) [16,18,19,20].

- **100-200°C** : décomposition de l'hydrotalcite [21].
- **350-450°C** : décomposition de la brucite [21].
- **300-450°C** : deshydroxylation de la katoïte, hydrogrenat riche en silice [22, 23].
- **400-600°C** : deshydroxylation de la portlandite (pic endothermique) [16, 24, 25].
- **600-900°C** : décomposition des carbonates de calcium [16, 24, 25].
- **750-1000 °C** : décomposition de la dolomite [26, 27, 28].

Les pâtes de liant sur lesquelles sont effectuées les mesures sont conservées dans une ambiance à $20\pm 1^\circ\text{C}$ et à $50\pm 2\%$ d'humidité relative pendant 10 mois. De ces pâtes nous prélevons des échantillons de 5 mm d'épaisseur. Ces échantillons sont broyés très finement, ensuite conservées dans des sacs étanches et l'essai est réalisé 24 heures après broyage.

II.3.4. Analyse par MEB-EDS

Cette procédure de caractérisation s'applique principalement aux pâtes de ciment. Elle permet d'une part, de déterminer le degré d'hydratation et, d'autre part, d'obtenir des informations sur la distribution spatiale des différentes phases de la pâte de ciment (porosité, anhydres et hydrates) [29]. Cette procédure peut aussi être utilisée pour caractériser d'un point de vue qualitatif le matériau béton. Elle permet alors de visualiser de manière comparative l'état d'hydratation [4].

Le principe de la microscopie électronique à balayage (MEB) consiste à déplacer un faisceau d'électrons de haute énergie et très focalisé (environ 50 nm de diamètre) suivant une série de lignes parallèles sur la surface de l'échantillon à analyser. L'interaction du faisceau d'électrons avec la surface induit différents phénomènes [4].

L'objectif de nos observations au microscope électronique à balayage (MEB) est d'identifier les différentes phases et hydrates formés dans nos pâtes de liant. Les pâtes de liant sont conservées dans une ambiance à $20\pm 1^\circ\text{C}$ et à $50\pm 2\%$ d'humidité relative pendant 12 mois. Nous visons aussi à suivre, au moins qualitativement, les modifications microstructurales dues à l'incorporation des additions minérales (vase calcinée et cendres volantes). Les observations ont été effectuées sur des fractures réalisées en mode environnemental [30]. Ce choix est stimulé par le désir d'éviter toute modification de la microstructure pouvant résulter d'un sciage ou du polissage de l'échantillon [30]. L'observation au MEB est couplée à des analyses chimiques par EDX (Energy Dispersive X-Ray) pour identifier les éléments chimiques

observés. Ces analyses ont été faites dans un laboratoire LaSIE à l'université de La Rochelle (France), avec un MEB de type FEI Quanta 200 ESEM/FEG Environnemental (figure II.11).

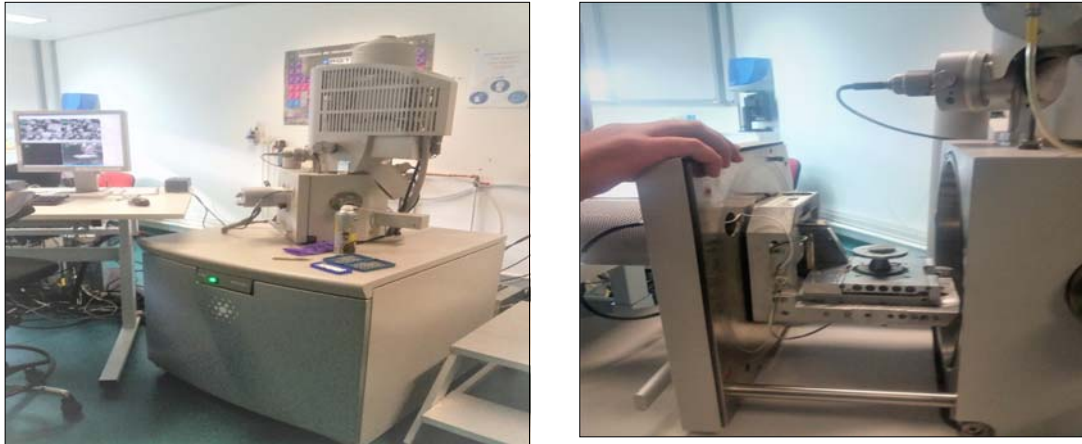


Figure II.11. Microscope électronique à balayage de type FEI Quanta 200 ESEM/FEG Environnemental

II.4. ESSAIS DE CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT DES MBAPE

II.4.1. Essai de porosité accessible à l'eau

Cet essai consiste à mesurer le pourcentage des vides connectés avec la surface, à l'intérieur de la masse du mortier, conformément à la norme NF P 18-459. La porosité est mesurée sur des éprouvettes prismatiques âgées de plus de 28 jours.

Une éprouvette de chaque formule a été soumise à un essai de flexion 3 points jusqu'à la rupture. Les deux demi-échantillons obtenus ont été rectifiés après la rupture. Leurs extrémités ont été sciées d'environ 0.8 cm afin d'obtenir deux demi-échantillons prismatiques.

Les échantillons sont par la suite séchés à 60°C jusqu'à stabilisation de leur masse. On place ensuite les demi-échantillons dans un dessiccateur étanche. Après fermeture du récipient, à l'aide d'une pompe à vide connectée au dispositif, on fait le vide du récipient jusqu'à ce que l'on atteigne une pression voisine de 100 mbars. Pour vérifier l'achèvement du dégazage des échantillons, on déconnecte le récipient de la pompe à vide et on s'assure sur le manomètre que la pression ne remonte pas. On maintient la pression réduite pendant 44 h puis on casse le vide et on ouvre le récipient. À la fin de cette étape, une pesée dans l'air est réalisée suivie d'une pesée hydrostatique des échantillons (figure II.12).

La porosité accessible à l'eau, ε , exprimée en pourcentage en volume est donnée par la relation suivante :

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \times 100 \quad \text{II.4}$$

Où :

M_{eau} : la masse en grammes de la demi-éprouvette immergée dans l'eau.

M_{air} : la masse en grammes de la demi-éprouvette imbibée, pesée dans l'air.

M_{sec} : la masse en grammes de la demi-éprouvette sèche.

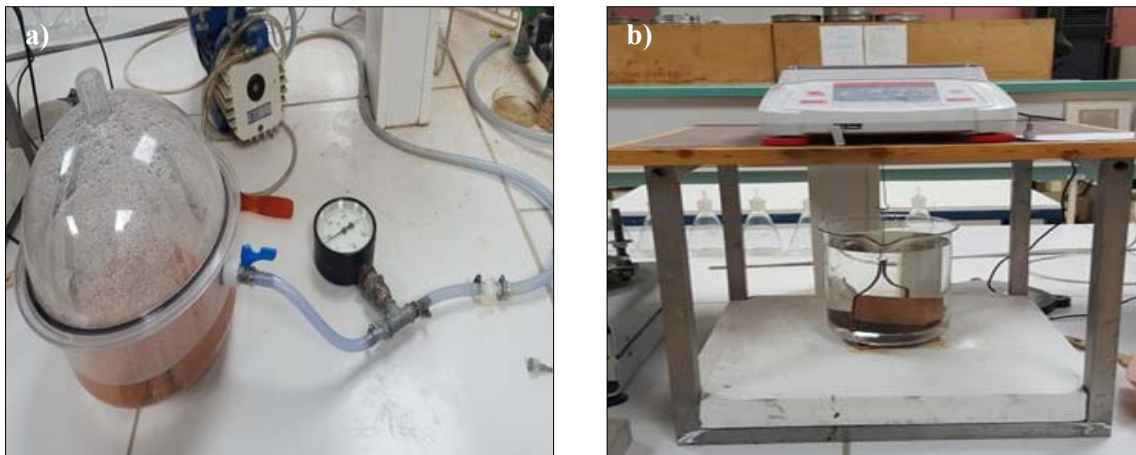


Figure II.12. Essai de porosité : a) Dessiccateur b) Pesée hydrostatique

II.4.2. Essai d'absorption capillaire

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de mortiers non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

Avant les mesures du taux d'absorption, les éprouvettes sont préconditionnées selon la norme EN 480-5 :2005 et selon les recommandations de la procédure AFREM.

L'essai a été réalisé sur des échantillons moulés de formes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$). L'échéance de mesure est de 28 jours de conservation dans une cure sèche. À l'issue de la période de cure, les échantillons sont conservés dans une étuve ventilée à $50 \pm 2^\circ\text{C}$. Durant cette période, le suivi de la masse est réalisé à un intervalle de temps régulier, jusqu'à ce que la variation de la masse entre deux pesées espacées de 24 heures soit inférieure à 0,1%.

Les éprouvettes sont alors placées dans des dessiccateurs pendant 24 heures pour permettre le retour en température. Par la suite, la surface supérieure et latérale de chaque éprouvette est

alors couverte de papier aluminium autocollant pour éviter l'évaporation de l'eau absorbée durant l'essai.

L'essai de l'absorption capillaire a été réalisé suite à ce pré-conditionnement. Les éprouvettes sont immergées dans l'eau du récipient sur une hauteur maximale de 3 mm à l'aide de cales (figure II.13). À chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge humide, pesées, puis replacées dans le récipient. Les échéances sont les suivantes : 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8 et 24 heures. L'essai est terminé après 24 h.

Le coefficient de sorptivité est défini par l'équation suivante :

$$S = \left(\frac{Q}{A}\right) / \sqrt{t} \quad \text{II.5}$$

Avec

S : le coefficient de sorptivité en (mm/h^{0,5}) ;

Q : le volume de l'eau absorbée en mm³ ;

A : la surface en contact avec l'eau en mm² ;

t : le temps écoulé en heures ;

La mesure de la sorptivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux.



II.13. Dispositif expérimental pour l'essai d'absorption d'eau par capillarité

II.5. ESSAIS DE CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DES MBAPE

II.5.1. Indices et coefficients d'activité pouzzolanique des additions minérales

Une étude préliminaire a été menée pour la détermination de l'indice d'activité de chaque addition. Ce dernier, noté i , est défini comme le rapport des résistances en compression $f_p(t)$ et $f_0(t)$, respectivement la résistance du mortier contenant une fraction p d'addition et la résistance du mortier témoin (sans addition). Au sens des normes EN 450 et NFP 18-506, cet

indice est déterminé pour $E/C = 0,5$ et $p = 0,25$ où l'indice d'activité est donné par l'équation (II.6) :

$$i(p) = f_p(t) / f_0(t) \quad \text{II.6}$$

Des prismes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ont été confectionnés pour la mesure de la résistance en compression sur les demi-échantillons rompus par flexion à 28 et 90 jours.

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 (II.7) :

$$L_{\text{équi}} = C + k \times A \quad \text{II.7}$$

Où C : masse du ciment, K : le coefficient d'activité et A : la masse du substitut utilisé.

Le coefficient K est déterminé par l'une des formules (II.8) ou (II.9) respectivement :

$$K = 1 - [(1/P) \times [1 - 0.5 \times (E/C)]] \times (1 - i) \quad \text{II.8}$$

$$K = 3 \times i - 2 \quad \text{II.9}$$

II.5.2. Mesure de la résistance à la compression et à la flexion

Les échantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique à la compression et à la flexion des différents mortiers autoplaçants étudiés selon la norme EN 196-1 sont des éprouvettes prismatiques ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$). Une fois coulés, les échantillons ont été recouverts d'un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. Le démoulage a été effectué à un jour d'âge. Les essais mécaniques ont été effectués sur des mortiers autoplaçants à 3, 7, 14, 28 et 90 jours, après une cure humide à 20°C . Les données rapportées pour chaque mortier représentent les valeurs moyennes obtenues à partir de trois essais pour la résistance à la flexion, et six essais pour celle à la compression [8]. Tous les essais concernant les résistances mécaniques des MBAPE ont été réalisés à l'aide d'un dispositif de compression et de flexion au laboratoire LaSIE à l'université de La Rochelle. (Figure II.14).

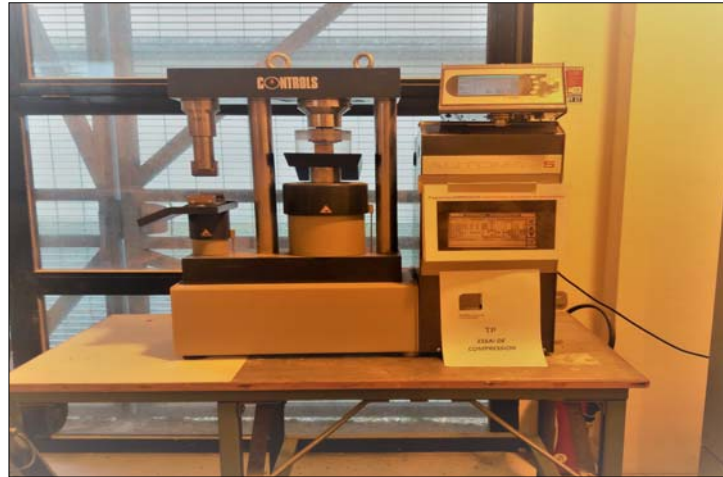


Figure II.14. Dispositif pour les essais des résistances mécaniques

II.5.3. Essai de retrait plastique

Le retrait plastique a lieu lorsque la pâte de béton se trouve dans la phase plastique. Quelques techniques expérimentales ont été évoquées dans la littérature pour effectuer des mesures linéiques, horizontales et verticales du retrait des matériaux cimentaires. Le principe consiste à mesurer la déformation longitudinale d'un échantillon coulé dans un moule.

Le problème majeur lié à l'utilisation de cette méthode est le frottement qui peut exister entre l'échantillon et le moule. Ce frottement peut être limité en lubrifiant les parois de contact. Pendant les vingt dernières années, des progrès ont été réalisés pour améliorer ces dispositifs expérimentaux. Jensen et Hansen [31] ont ainsi pu mesurer la déformation avant la prise. Ils ont proposé un dispositif permettant d'éliminer le frottement entre l'échantillon et le moule en assurant l'isolation parfaite de l'échantillon, contrairement à Craeye et De Schutter [32]. Cependant l'utilisation des capteurs de type de LVDT engendre un effort normal exercé sur le matériau, ce qui surestime le retrait du matériau avant la période de prise.

Les éléments du dispositif sont présentés sur la figure II.15. Le moule de retrait est un moule prismatique en PVC, de dimensions $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$. Les deux extrémités sont percées en leur centre une ouverture circulaire afin de pouvoir insérer des capteurs lasers. À l'intérieur du moule est placé un film plastique très fin et très souple pour limiter les frottements, et deux plaques en PVC de dimensions $(69 \times 69 \times 2 \text{ mm}^3)$ pour visées aux capteurs lasers. Lorsque le mortier se rétracte, les plaques PVC entraînent les capteurs de déplacement utilisés et permettent de mesurer le déplacement longitudinal à mi-hauteur de l'échantillon. Chaque capteur enregistre le déplacement à mi-hauteur de l'éprouvette. Le retrait obtenu correspond à

la somme des déplacements enregistrés à mi-hauteur, par les deux capteurs de déplacement (de chaque côté).

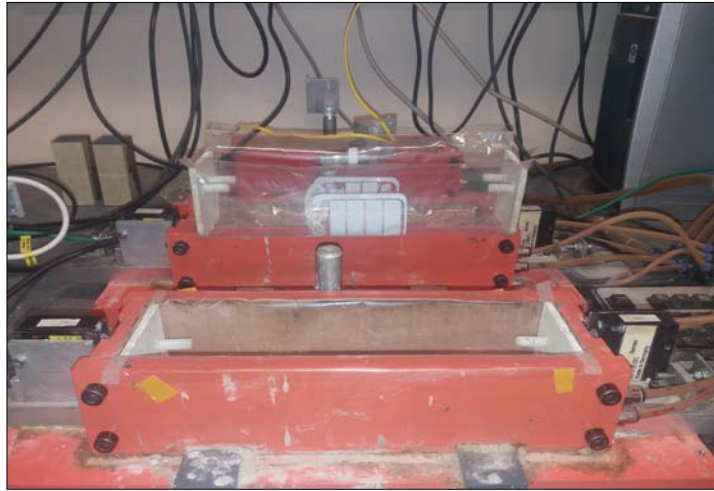


Figure II.15. Dispositif de mesure de retrait plastique (laboratoire GeM de l'école centrale de Nantes)

L'usage de vis permet une récupération beaucoup plus facile des plaques PVC après décoffrage (figure II.16).

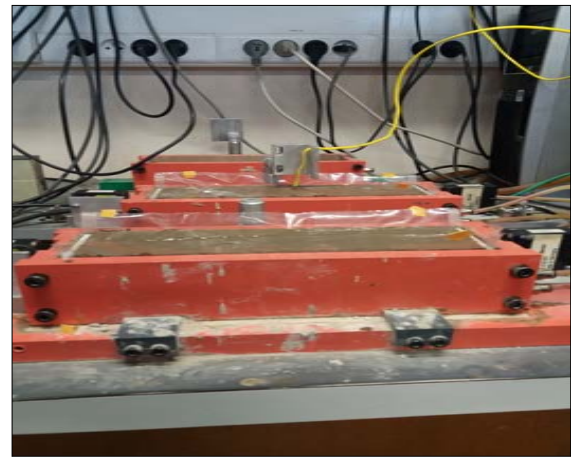


Figure II.16. Mesure du retrait plastique des MBAPE de cette étude

En parallèle à ces essais, des mesures continues et automatiques de perte de masse sont effectuées sur des cylindres de diamètre 110 mm et de hauteur 70 mm posés sur des balances (figure II.17). Chaque cylindre offre une surface d'évaporation de 78.5 cm². L'évaporation est définie par le rapport :

$$E_r = \frac{m_0 - m_t}{S}$$

II.10

Où, m_0 est la masse initiale de l'éprouvette, m_t la masse de l'éprouvette à l'instant t et S la surface d'évaporation égale à 78.5 cm^2 .



Figure II.17. Dispositif de la mesure en continue de la perte de masse

II.5.4. Essai de retrait libre (total, endogène et de dessiccation)

Nous nous sommes intéressés au retrait libre (endogène, total et de dessiccation) de nos mortiers autoplaçants. L'étude a été réalisée conformément à la norme française NF P 15-433. Les mesures ont été réalisées en modes endogène et de dessiccation sur des éprouvettes de forme prismatique ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$). Lors du moulage, des plots métalliques d'un cm de hauteur ont été noyés dans le mortier aux deux extrémités du moule, et ont été positionnées axialement dans le sens longitudinal du prisme. Six éprouvettes sont coulées pour chaque formulation : 3 éprouvettes pour la mesure du retrait endogène et 3 autres éprouvettes pour la mesure du retrait total. Après démoulage, 24 heures après le coulage du mortier, les éprouvettes destinées pour l'étude du retrait endogène sont recouvertes sur toute leur surface par un papier aluminium adhésif pour empêcher tout échange hydrique avec l'extérieur. Toutes les éprouvettes sont ensuite entreposées dans une pièce régulée en température de ($20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) et en hygrométrie ($50\% \pm 2\%$). Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un comparateur micrométrique avec une précision de 0.001 mm régulièrement (figure II.18).

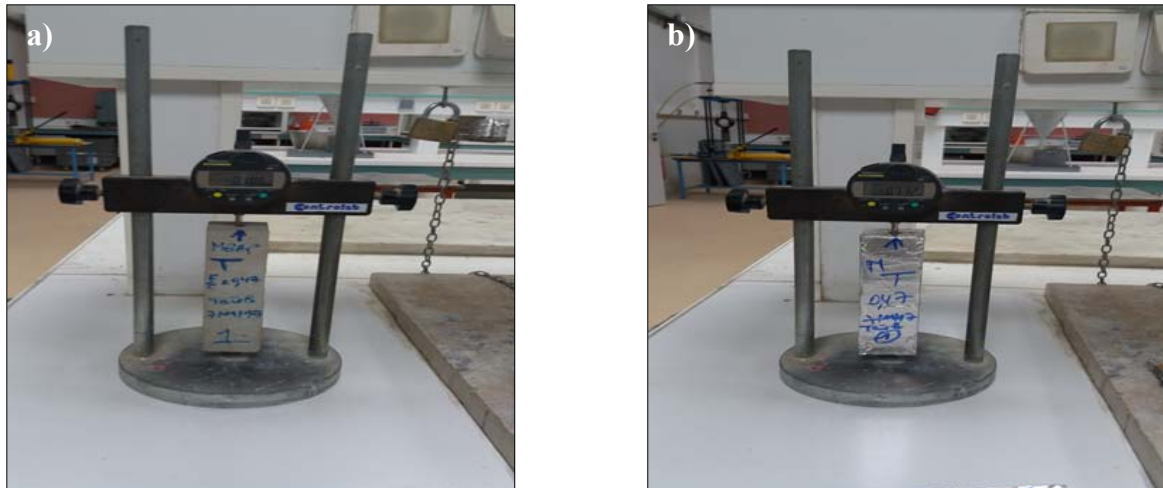


Figure II.18. Mesure du retrait des MBAPE (laboratoire LGCGM à IUT de Rennes) : a) retrait total, b) retrait endogène

Les éprouvettes de retrait total ont été pesées aussi régulièrement après chaque mesure de retrait afin de corrélérer la variation de masse au retrait total. Les éprouvettes destinées au retrait endogène ont été également régulièrement pesées afin de vérifier l'étanchéité appliquées à ces éprouvettes et donc de vérifier qu'il n'y a pas eu de perte de masse (figure II.19).

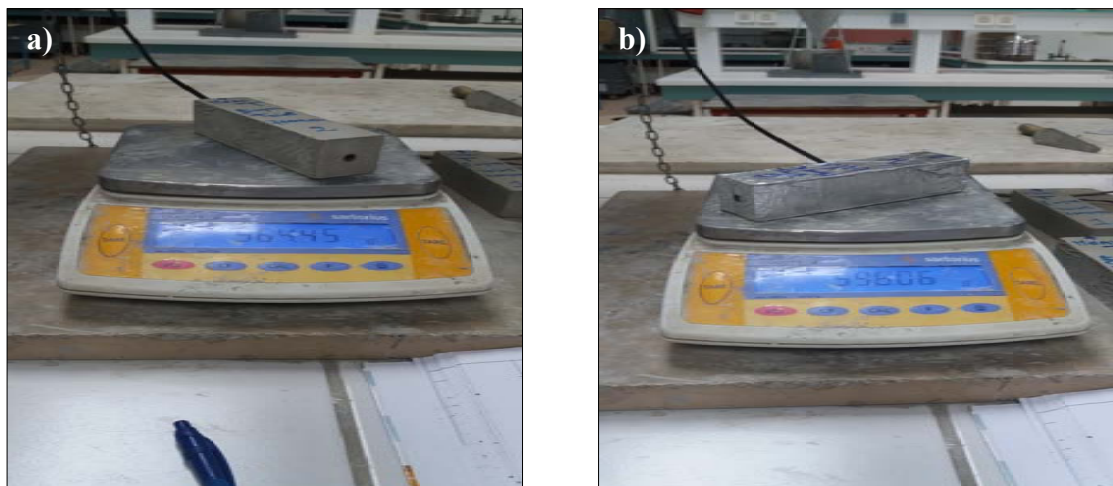


Figure II.19. Mesure le poids des MBAPE : a) poids total b) poids endogène

II.5.5. L'âge et la largeur de la fissuration des MBAPE

Dans l'étude de la tendance à la fissuration au jeune âge de nos mortiers autoplaçants, nous avons procédé à des essais de retrait empêché en utilisant les essais à l'anneau et ceci dans une salle régulée en température 20 ± 1 °C et $50 \pm 2\%$ d'humidité relative. L'essai de retrait empêché a été réalisé selon la norme ASTM C.1581 [33], une pratique standard pour estimer la tendance de la fissuration du mortier. La méthode d'essai consiste à couler un anneau de mortier autour d'un anneau en acier. L'anneau central, en acier, a une épaisseur de 25 mm, une hauteur de 140 mm, un diamètre intérieur de 260 mm ($r_2 = 13$ cm) et un diamètre extérieur de 310 mm ($r_1 = 15.5$ cm). L'échantillon de l'anneau en mortier a un diamètre extérieur de 380 mm ($r_0 = 19$ cm), et une section de 35×140 mm². La géométrie de l'anneau est décrite dans la figure II.20 [3].

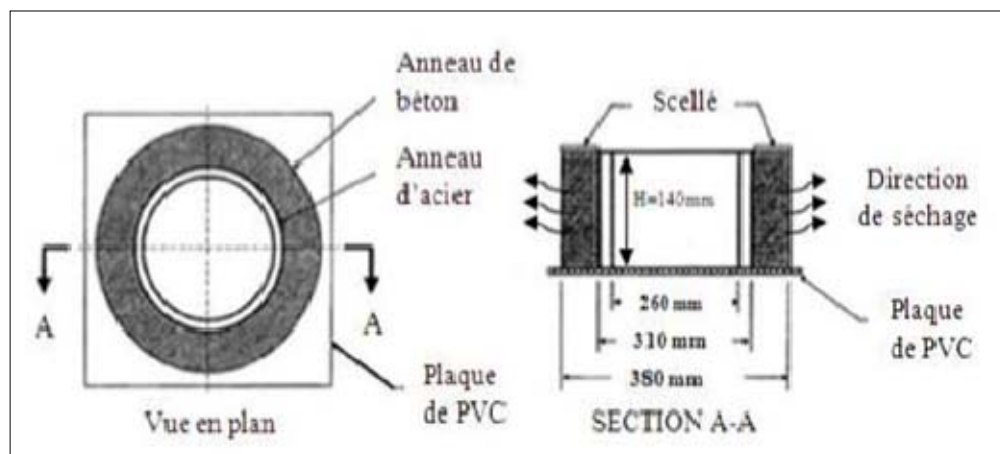


Figure II.20. Géométrie de l'anneau en acier et en mortier utilisés dans cette étude [3].

Afin de pouvoir suivre l'évolution de la fissuration du mortier étudié, un capteur de fissure est installé sur la surface de l'anneau dès que la fissure apparaît. À l'aide d'une loupe micrométrique, l'ouverture de la fissure est relevée avant l'installation du capteur de fissure. Une seule et unique fissure est à chaque fois observée sur les échantillons testés. Les mesures de l'ouverture de la fissure sont enregistrées toutes les 15 minutes par le même système d'acquisition. Dans cette étude, les surfaces supérieure et inférieure des anneaux de mortier (figure II.21) sont protégées de la dessiccation par une double couche d'adhésif aluminium et que la surface circonférentielle est exposée à un séchage [3] (figure II.22).

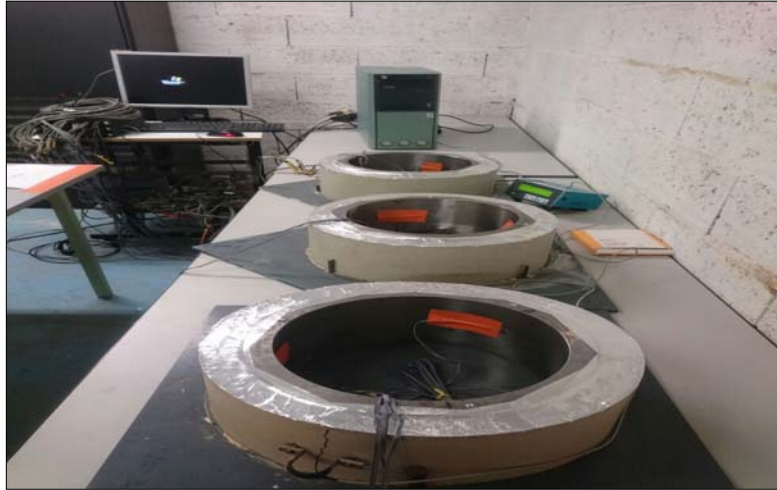


Figure II.21. Anneaux de mortier de cette étude

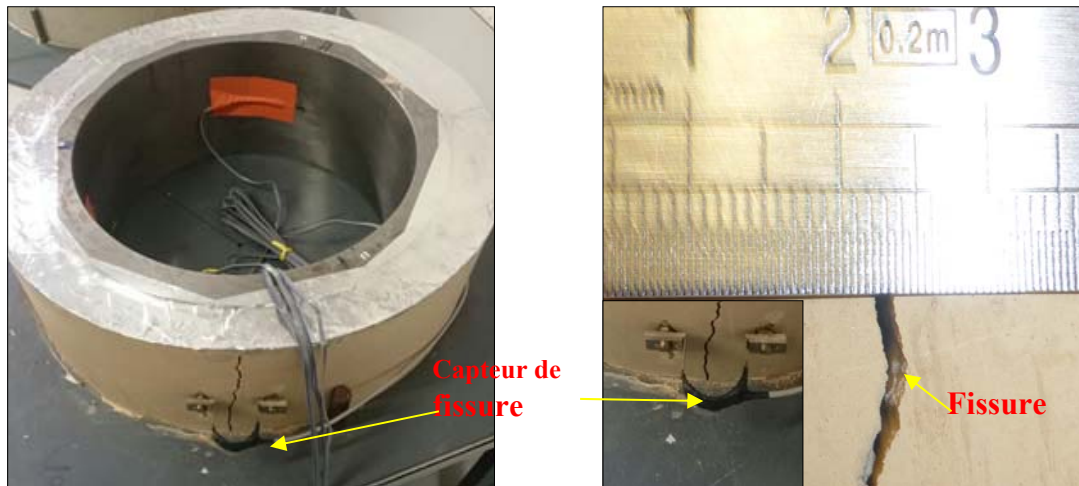


Figure II.22. La fissuration de l'anneau du mortier avec l'installation du capteur de fissure

II.6. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents protocoles expérimentaux mis en œuvre lors de ce travail de thèse. Cette campagne expérimentale a pour but l'étude du retrait des mortiers autoplacants à base de sédiments traités par calcination comparés à ceux des cendres volantes (le retrait plastique, le retrait libre et la fissuration), la mesure de quelques indicateurs de leurs propriétés de transfert (absorption capillaire, porosité ouverte) et la microstructure des pâtes de liant (analyse DRX, analyse ATG-DTG et analyse MEB-EDS). Dans le chapitre suivant, nous exposons les différents résultats de cette campagne expérimentale.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] GUNEYISI E., GESOG LU M., « Properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and metakaolin ». Mater. Struc. 41:1519–1531. Doi 10.1617/s11527-007-9345-7. 2008.
- [2] FNARC « Specification and guidelines for self-compacting concrete ». 29–35. Free pdf copy download able from. <http://www.efnarc.org> (2002).
- [3] NEZHAD N., « Contribution à l'étude du comportement mécanique, du retrait et des propriétés de transport des bétons autoplacants avec additions minérales, approche numérique et expérimentale ». PhD thèse de doctorat. INSA de Rennes, France, 2015.
- [4] Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, caractéristiques de microstructures et propriétés relatives à la durabilité des bétons, méthodes d'essai n° 58, Février 2002.
- [5] ZATER M., « Caractérisation et étude 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).
- [6] Cours de Minéralogie – 3ème année « Étude des cristaux par les rayons X ». École national polytechnique, département génie minier.
- [7] BELGUESMIA K., « Optimisation d'un éco-BAP à base de sédiment de dragage vis-à-vis des états frais, durci et de la durabilité ». Thèse de doctorat, Université des sciences et de technologie, Mostaganem, 01 Juillet, 2018.
- [8] NGUYEN V.H., « Effets d'additions minérales sur l'apparition de la Réaction Sulfatique Interne : étude paramétrique, développement et optimisation de méthodes accélérées », le 12 Juillet 2013, IUT de Saint Nazaire, Nantes.
- [9] HAMAMI A.E., « Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires », le 17 Juin 2009, Université de La Rochelle.
- [10] ROZIER E., « Étude de la durabilité des bétons par une approche performancielle ». Thèse de doctorat, l'École Centrale de Nantes, 2007.
- [11] EYRAUD C., ACCARY A., « Analyses thermiques et calorimétriques différentielles ». Techniques de l'ingénieur PE 1295. 1992.
- [12] TAYLOR H.F.W., « Cement chemistry ». London, Thomas Telford Publishing. 1997.

- [13] VILLAIN G., PLATRET G., «Two Experimental Methods to Determine Carbonation Profiles in Concrete». ACI Materials Journal 103 (4) 2006.
- [14] BORGES P.H.R., COSTA J.O., MILESTONE N.B., LYNDALE C.J., and STREATFIELD R.E., «Carbonation of CH and C-S-H in composite cement pastes containing high amounts of BFS». Cement and Concrete Research 40: 284-292. (2010).
- [15] BAROGHEL-BOUNY V., CHAUSSADENT T., CROQUETTE G., DIVET L., GAWSEWITCH J., GODIN J., HENRY D., PLATRET G., and VILLAIN G., «Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons». Méthodes de mesure et d'essai de laboratoire. Méthodes d'essai n°58 – LCPC. (2002).
- [16] RAMACHANDRAN V.S., RALPH M.P., BAUDOIN J.J., & DELGADO A.H., «Handbook of thermal analysis of construction materials». Noyes Publications (2002).
- [17] KLEMM W.A., «Research and development bulletin. Ettringite and oxyanion-Substituted Ettringite their characterization and applications in the fixation of heavy metals: a synthetic of the literature». Portland Cement Association. (1998).
- [18] ZHOU Q., GLASSER F.P., «Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at 120°C». Cement and Concrete Research 31(9): 1333-1339. (2001).
- [19] BERGER S., Ph.D. Thesis. « Étude des potentialités des ciments sulfo-alumineux bétaliques pour le conditionnement du zinc – De l'hydratation à la durabilité ». Université de Lille 1, 2009.
- [20] MELLER N., KYRITSIS K., & HALL C., «The hydrothermal decomposition of calcium monosulfoaluminat 14-hydrate to katoite hydrogarnet and beta-anhydrite: An in-situ synchrotron X-ray diffraction study». Journal of Solid State Chemistry 182(10) :2743. (2009).
- [21] COLLIER N., & MILESTONE N.B., «The encapsulation of Mg (OH)₂ sludge in composite cement». Cement and Concrete Research 40(3) :452-459. (2010).
- [22] PASSAGLIA E., & RINALDI R., «Katoite, a new member of the Ca₃Al₂(SiO₄)₃-Ca₃Al₂(OH)₁₂ series and a new nomenclature for the hydrogrossular group of minerals». Bulletin de Minéralogie 107(5) :605-618. (1984).
- [23] RIVAS-MERCURY J.M., PENA P., DE AZA A.H., & TURRILLAS X., «Dehydration of Ca₃Al₂(SiO₄)_(y) (OH)_{(4(3-y))} (0<y<0.176) studied by neutron thermodiffraction». Journal of The European Ceramic Society 28(9): 1737-1748. (2008).
- [24] THIERY M., Thèse de doctorat. «Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires». Paris, École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC): 331p. (2005).

- [25] VILLAIN G., THIERY M., PLATRET G., «Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry». *Cement and Concrete Research* 37(8):1182-1192. (2007).
- [26] FAZELI A.R., & TAREEN J.A.K., «Thermal decomposition of rhombohedral double carbonates of dolomite type». *Journal of Thermal Analysis* 38(11): 2459-2465. (1992).
- [27] KOK M.V., & SMYKATZ-KLOS W., «Thermal characterization of dolomites». *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 64(3): 1271-1275. (2001).
- [28] MAITRA S., CHOUDHURY A., DAS H.S., & PRAMANIK M.J., «Effect of compaction on the kinetics of thermal decomposition under non-isothermal condition». *Journal of Materials Science* 40(18): 4749-4751. (2005).
- [29] SCRIVENER K.L., PRATT P.L., «Backscattered electron images of polished cement sections in the scanning electron microscope». *Proceedings of the 6th International Conference on Cement Microscopy*, New Mexico, 1984.
- [30] CHERIF R., « Étude de l'effet de la composition de la solution interstitielle des matériaux cimentaires sur les interactions multi-espèces lors des transferts de chlorures ». Université de La Rochelle, 16/01/2018.
- [31] JENSEN O.M., HANSEN P.F., «A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste». *Materials and structures*, vol. 28, n°181, 1995, p. 406-409.
- [32] CRAEYE B., DE SCHUTTER G., «Proceeding of the international RILEM conference: volume changes of hardening concrete: testing and mitigation», Ole Mejlhede Jensen, Pietro LURA and Konstantin Kovler, p. 21-30. (2006).
- [33] ASTM C., «Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage» 1581, 2004.

PARTIE III.

ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

CHAPITRE I.

RÉSULTATS ET ANALYSE DE L'ÉTAT FRAIS ET DE LA MICROSTRUCTURE

CHAPITRE I. RÉSULTATS ET ANALYSE DE L'ÉTAT FRAIS ET DE LA MICROSTRUCTURE

I.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre sont exposés les résultats des mesures de l'étalement, du temps de prise sur les six formulations des mortiers autoplçants et des analyses microstructurales sur les six formulations des pâtes de liant afin d'apporter quelques éléments d'information sur l'effet des additions d'étude sur le comportement à l'état frais des MBAPE ainsi que sur le développement de la microstructure de leurs pâtes de liant.

I.2. CARACTÉRISATION DES MBAPE À L'ÉTAT FRAIS

Afin de valider les formulations de MBAPE, il faut que ces dernières possèdent les qualités préconisées pour ce type de mortier.

I.2.1. Influence des additions minérales sur l'étalement

Les résultats des essais d'étalement des mortiers de béton autoplçant équivalent sont donnés dans le tableau I.1.

Tableau I.1. Récapitulatif des résultats d'étalement des MBAPE étudiés

MBAPE	MBAPET	MBAPEVC	MBAPECV	MBAPET	MBAPEVC	MBAPECV
	0.39	0.39	0.39	0.47	0.47	0.47
Étalement Ø (cm)	19.75	20	19.38	19.25	20	19.25

Tous les mélanges de mortier ont été conçus pour donner un diamètre d'étalement de 20 ± 1 cm [1] (en évitant la ségrégation et le ressuage) qui a été acquis en ajustant l'usage de l'adjuvant utilisé [2]. Les résultats d'essai d'étalement présentés dans le tableau I.1 et figure I.1 montrent clairement que les MBAPE présentent des valeurs satisfaisantes et rapprochées comprise entre 19.25 et 20 cm. Les écarts entre ces valeurs sont relativement faibles et ne permettent pas d'identifier une quelconque influence du type d'additions minérales sur le comportement à l'état frais qui pourraient provenir de la forme de leurs particules ou de la demande en eau [3]. Il a été observé que l'utilisation de la vase calcinée augmentait légèrement le diamètre d'étalement des mélanges. Mais il convient de préciser que tous les

mortiers testés se positionnent dans des fourchettes de valeurs assez resserrées eu égard les incertitudes d'essai reconnues pour cet essai [4].

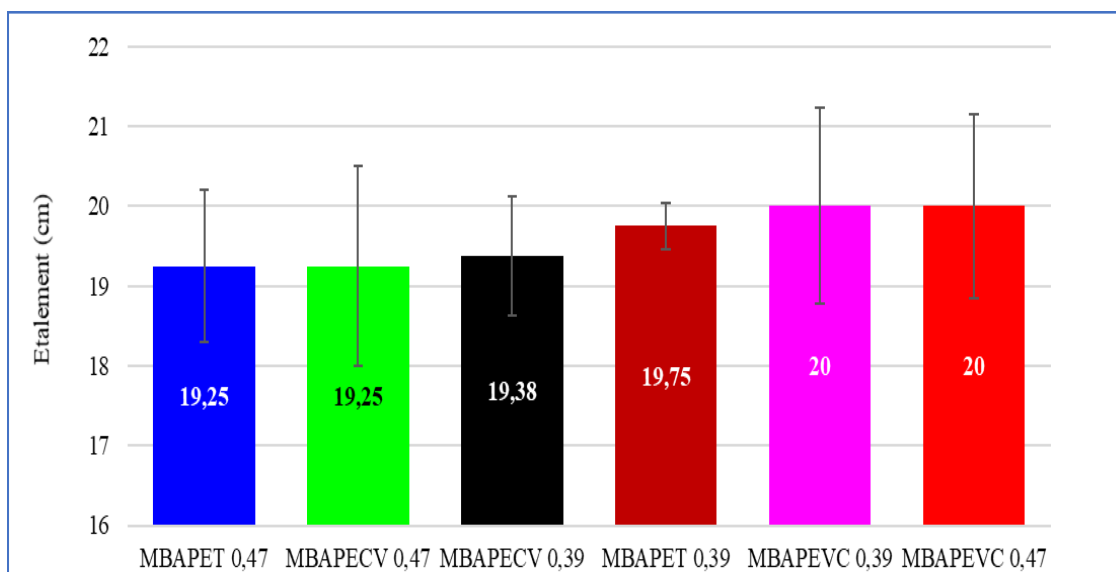


Figure I.1. Variation d'étalement des MBAPE étudiés

I.2.2. Influence des additions minérales sur le temps de prise

Les résultats des essais du temps de prise des MBAPE étudiés sont donnés dans le tableau I.2

Tableau I. 2. Récapitulatif des résultats de temps de prise des MBAPE étudiés

MBAPE	MBAPET 0.39	MBAPEVC 0.39	MBAPEVC 0.39	MBAPET 0.47	MBAPEVC 0.47	MBAPEVC 0.47
Début de prise (min)	225	135	120	245	458	213
Fin de prise (min)	445	390	840	282	520	238
Temps de prise (min)	220	255	720	360	590	230

Les résultats de mesure des temps de prise des différents MBAPE avec les deux rapports $E/l=0.39$ et 0.47 sont représentés sur la figure I.2.

Avec le rapport $E/L=0.39$, on peut constater que le mortier à base des cendres volantes a un effet très significatif sur le temps de prise par rapport à celui du mortier de référence. Cela est dû au remplacement du ciment par les cendres volantes. Cependant, les temps de début et de fin de prise du MBAPE contenant la vase calcinée diminuent par rapport à celui du mortier de référence. Cela s'explique par le fait que la cinétique d'hydratation est accélérée, il y a donc une précipitation et germination rapide des cristaux de C-S-H responsables du durcissement qui finalement, vont causer à leur tour une diminution du temps de début et de fin de prise [5]. On constate également que le remplacement du ciment portland par les cendres volantes implique un retard dans le temps de prise en comparaison avec la vase calcinée. Ce retard peut être attribué à la plus faible chaleur d'hydratation, la cinétique d'hydratation étant retardée [6]. Quant à le rapport $E/L=0.47$, il était facile de constater que les additions minérales (vase calcinée et cendres volantes) avaient un effet très léger sur les temps de prise des mortiers formulés par rapport à celui de MBAPET0.47 avec un écart maximal de 25 minutes. Cela peut être expliqué par le fait que la finesse du mélange attribuée plus à la vase calcinée ($8310 \text{ cm}^2/\text{g}$) qu'à la cendre volante ($4334 \text{ cm}^2/\text{g}$) et au ciment ($3800 \text{ cm}^2/\text{g}$) permet d'avoir une large surface de contact avec l'eau. Aussi cette augmentation de temps de prise est due à la plus faible chaleur d'hydratation des mortiers avec ajouts ; conséquence d'une plus faible teneur en clinker. En effet, Jian. S et al. [7] ont étudié l'effet des additions minérales, telles que les cendres volantes, la fumée de silice et le laitier de haut fourneau avec différents pourcentages, sur la chaleur d'hydratation des mortiers. Ils ont conclu que le processus d'hydratation endothermique du mortier est très influencé par le remplacement d'une partie de ciment par l'un de ces ajouts. Ainsi, le retard dans les temps de prise lors de l'introduction des additions étudiées peut être dû à la faible hydraulité des cendres volantes et de la vase calcinée. Il est également noté que le remplacement du ciment Portland par des cendres volantes a entraîné un retard dans le temps de prise initial et final du mortier obtenu par rapport à celui du mortier contenant de la vase calcinée. Le retard peut être attribué à plusieurs facteurs, tels que la grande finesse de la vase calcinée, la teneur plus élevée en superplastifiants dans le MBAPEVC 0.47 par rapport à celle de MBAPEVC0.47 et une cinétique d'hydratation lente de ce dernier au jeune âge.

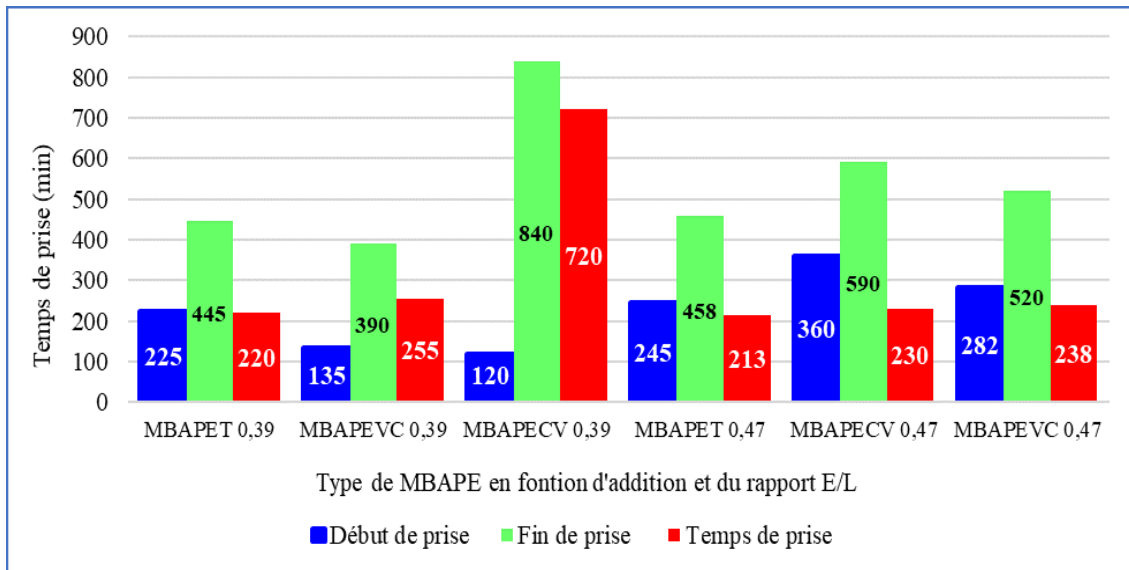


Figure I.2. Les temps de début de prise, de fin de prise et le temps de prise des MBAPE étudiés

I.3. INFLUENCE DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LA MICROSTRUCTURE DES PÂTES DE LIANT

I.3.1. Évolution de la teneur en eau liée et libre

Le tableau I.3 présente les résultats des mesures en termes d'eau libre, eau liée et de la teneur en CO₂ pour les six pâtes de liant à 28 jours de cure sèche.

Tableau I.3. Teneur en eau libre, en eau liée et en CO₂ mesurées sur des pâtes d'étude

Pâtes de liant	PT 0.39	PVC 0.39	PCV 0.39	PT 0.47	PVC 0.47	PCV 0.47
Teneur en eau liée (%)	13.46	13.80	10.35	13.78	14.06	10.81
Teneur en eau libre (%)	16.63	19.08	17.92	20.54	22.86	21.41
Teneur en CO ₂ (%)	2.51	2.91	4.22	2.96	3.16	4.10

Les résultats présentés sur la figure I.3 montrent une teneur moins importante en eau liée pour les mélanges contenant des cendres volantes par rapport aux pâtes contenant la vase calcinée

et aux pâtes de référence, ce qui indique une hydratation moins importante et ainsi le développement probable d'une plus faible quantité d'hydrates au jeune âge [6], et donc une résistance moins importante en comparaison avec la résistance des mortiers de référence et mortiers à base de vase calcinée. Les résultats montrent une teneur plus importante en eau liée pour le mélange avec vase calcinée comparé aux autres mélanges, ce qui indique une hydratation plus importante et ainsi le développement probable d'une plus grande quantité d'hydrates.

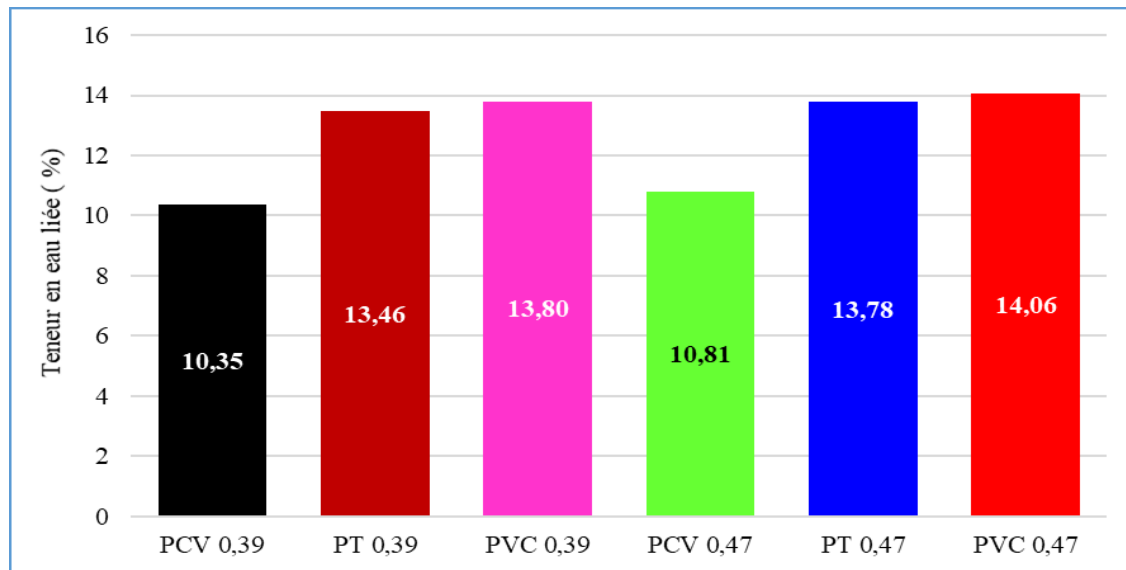


Figure I.3. Teneur en eau liée de pâtes étudiées

La figure I.4 présente les résultats des mesures de la teneur en eau libre pour les six pâtes de liant à 28 jours de cure sèche. Le liant à base de vase calcinée présente la plus forte teneur en eau libre proche de celle de la pâte de référence, cela peut être expliqué par le fait que les grains de la vase calcinée sont très fins et leurs surfaces sont rugueuses ce qui explique la forte demande en eau de cette vase [8].

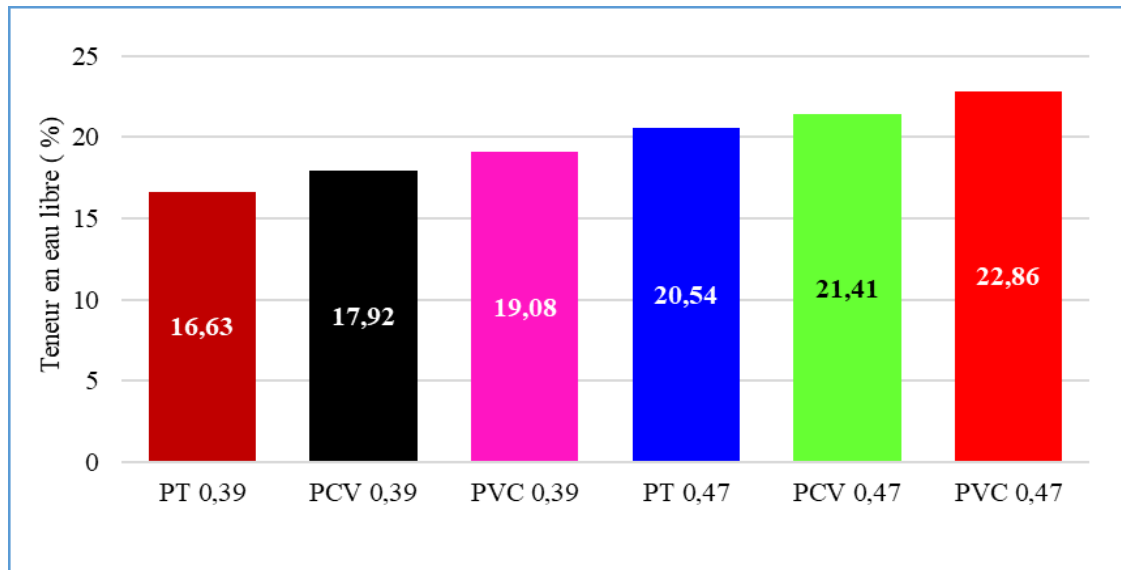


Figure I.4. Teneur en eau libre de pâtes étudiées

La figure I.5 montre les résultats concernant la teneur en CO_2 dans les six pâtes de liant après 28 jours de durcissement à sec. Ces résultats indiquent que la teneur en CO_2 est plus faible dans les mélanges contenant de la vase calcinée que dans ceux contenant des cendres volantes. L'état de la carbonatation joue également un rôle majeur. Dans le cas des matériaux à base de ciment Portland, la carbonatation entraînait une diminution du coefficient de diffusion, laquelle était bien corrélée à la diminution de la porosité [9]. En revanche, la teneur en CO_2 de la pâte de cendres volantes a augmenté tandis que sa porosité et sa teneur en eau liée diminuaient. L'augmentation de la carbonatation des cendres volantes moins poreuses par rapport à la vase calcinée peut être liée aux différences de structure poreuse. L'utilisation de cendres volantes donne une structure poreuse plus dense, mais en même temps une partie de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est consommée par l'hydratation des cendres volantes, ce qui conduit à une profondeur de pénétration élevée [10].

La profondeur de la carbonatation dépend également de la nature de l'addition, en particulier de la teneur en CaO des cendres volantes. Plus cette teneur est élevée, plus la profondeur de la carbonatation est basse [10]. Cela peut s'expliquer par le faible pourcentage de CaO (3%) dans les cendres volantes par rapport à la vase calcinée (17%). Dans la littérature, plusieurs recherches sur la carbonatation des mortiers et des bétons [11-14], rapportent l'effet négatif de la substitution du ciment par la cendre volante. Selon ces recherches, la consommation d'une partie de portlandite par réaction pouzzolanique augmente la profondeur de la carbonatation.

Selon Audenaert et al. [13], l'incorporation de cendres volantes n'a eu aucun effet notable sur l'amélioration de la résistance des BAP à la carbonatation.

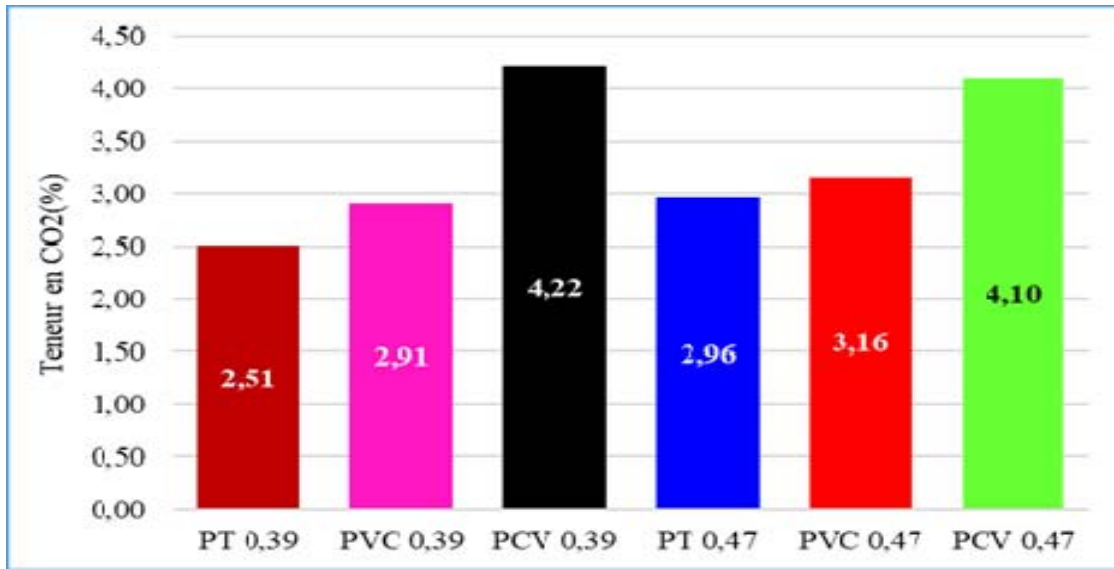
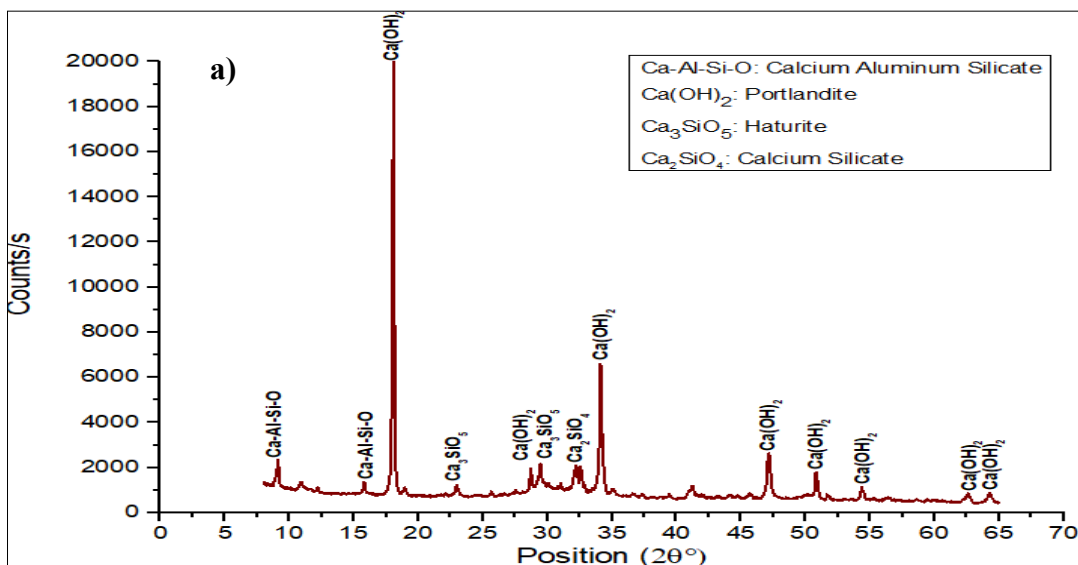
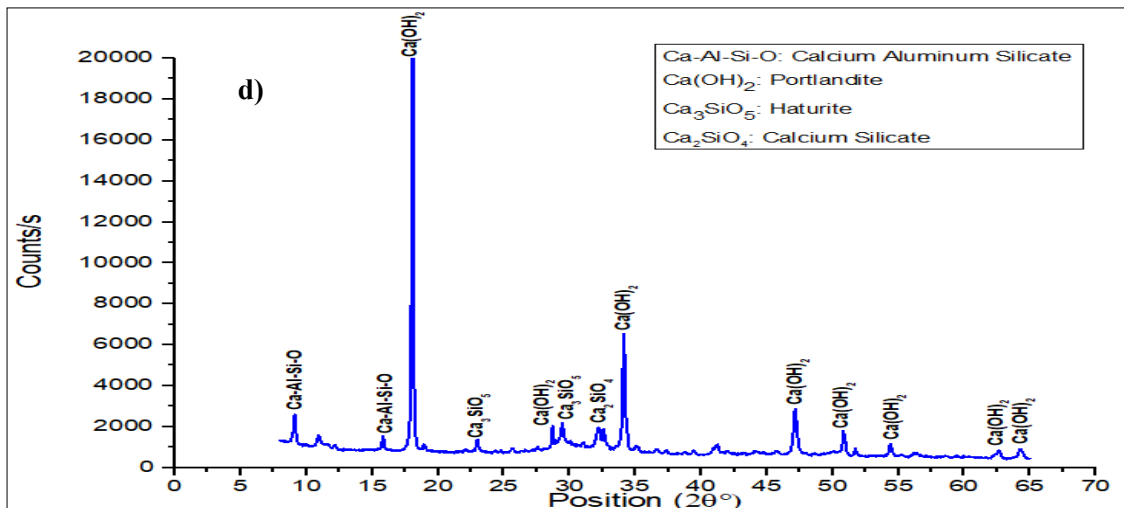
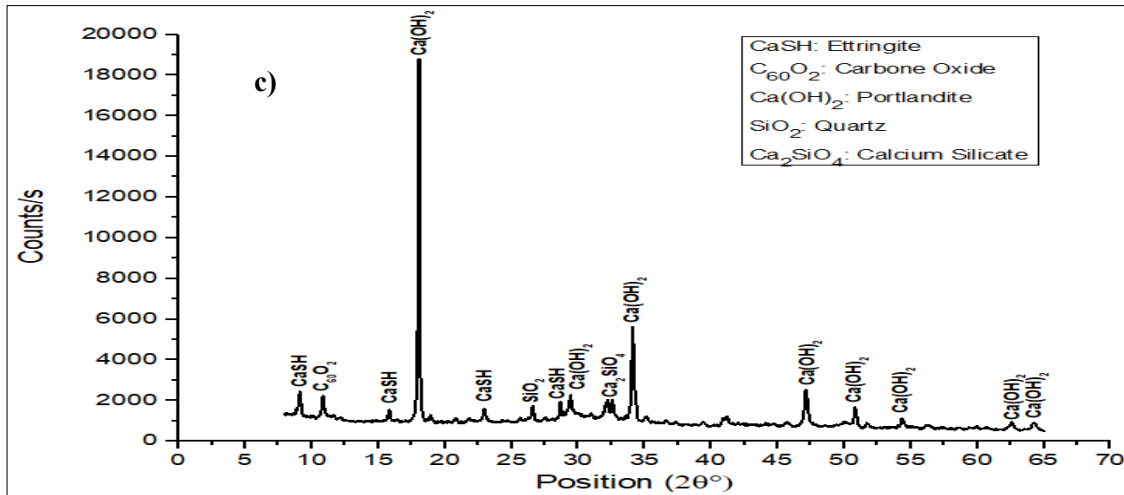
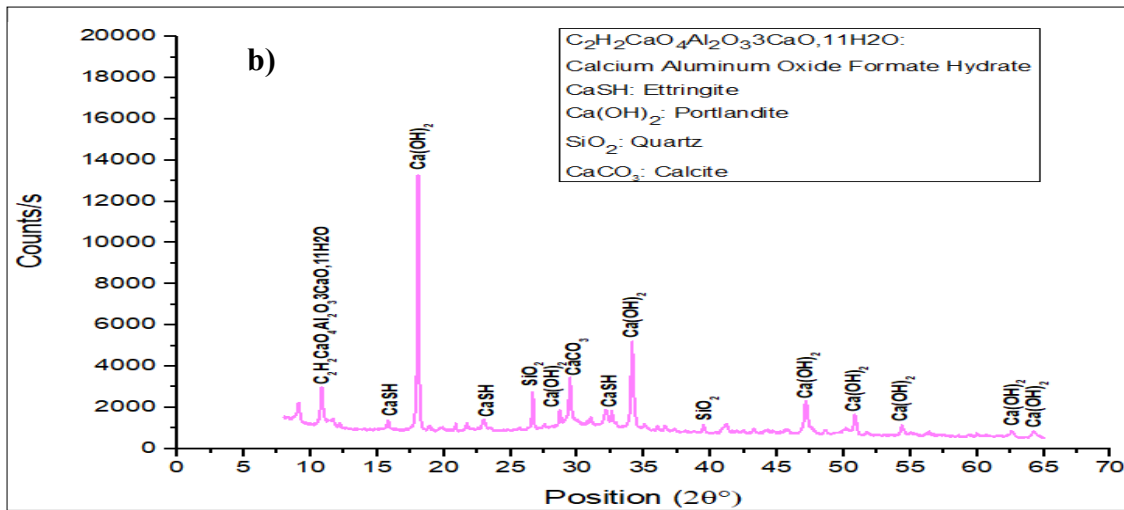


Figure I.5. Teneur en CO₂ de pâtes étudiées

I.3.2. Analyse DRX

La figure I.6 présente les diffractogrammes obtenus sur des échantillons de pâtes de liant âgées de 28 jours de cure sèche. L'analyse de ces spectres montre la présence d'une quantité significative de la portlandite, due à l'hydratation de la pâte. On remarque également la présence du Quartz, de l'ettringite dans les deux pâtes à base d'addition minérale (PCV et PVC) et leur absence dans la pâte de référence (PT).





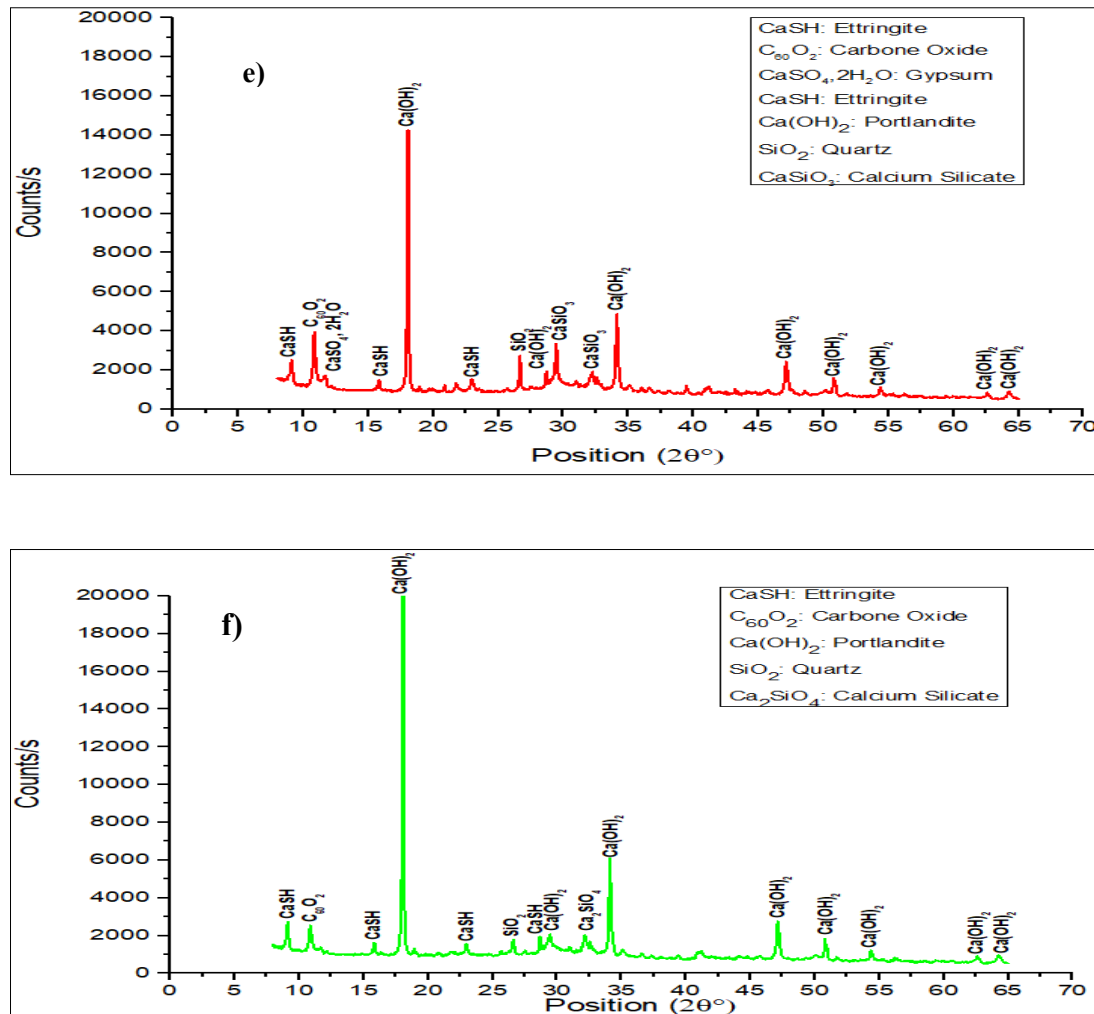


Figure I. 6. Diffraction aux rayons X des pâtes de liant étudiés : a) PT0.39, b) PVC 0.39, c) PCV 0.39, d) PT 0.47, e) PVC 0.47, f) PCV 0.47

Nous pouvons remarquer une grande quantité de la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour toutes les pâtes étudiées. Les intensités des pics de la portlandite semblent plus importantes pour le cas du PT et PCV en comparaison avec PVC, du fait de sa consommation par réaction pouzzolanique, donc il est clair que le mortier avec les cendres volantes est moins réactif que le mortier de ciment mélangé par la vase calcinée. L'augmentation de l'activité pouzzolanique peut être attribuée à la taille des particules amorphes de la vase qui facilitent les réactions pouzzolaniques nécessaires pour produire une matrice dense avec des CSH supplémentaires et moins d'hydroxyde de calcium. Ce qui est en accord avec les résultats de la résistance à la compression. Alors que l'ettringite, se trouve en particulier dans les pâtes à base de vase

calcinée et à base des cendres volantes et qui ne semble pas exister pour la pâte témoin. En outre, le sulfate de calcium constitué va réagir avec la phase d'aluminate de calcium dans le ciment pour former du trisulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite) [15], ce qui explique la présence de traces de cet élément, cependant la densité des pics d'ettringite est moins importante par rapport à celle de la portlandite. Dans l'ensemble, on peut dire que les pics qui caractérisent l'ettringite sont plus intenses pour le PVC et le PCV que pour le PT. L'analyse de ces spectres montre la présence du Quartz, en particulier pour la PVC et la PCV et qui ne semble pas exister pour la PT due à la vase traitée et aux cendres volantes. Le Quartz pourrait jouer un rôle dans la rigidification et le verrouillage de la matrice. En effet, il améliore le contact entre les différentes particules solides et ceci diminuerait la porosité du matériau et augmenterait ainsi sa résistance en compression. La pâte à base de vase calcinée, est caractérisée par la présence d'une quantité de calcite, cela est peut-être dû à la sensibilité des fines à la carbonatation pendant la préparation pour l'analyse. Nous pouvons constater aussi la présence d'une quantité de gypse pour PVC 0.47.

En comparant les trois spectres de pâtes de liant, nous pouvons constater, pour toutes les pâtes, l'existence de la portlandite. En effet, cette dernière a réagi avec la silice pour former du CSH. En conclusion, nous pouvons dire, que dans la pâte à base de sédiment traité qu'une partie de la chaux libérée du ciment a été consommée par la vase pour donner naissance à un gel de silicate de calcium hydraté type CSH non détectable par la diffraction des rayons X [16,17].

I.3.3. Analyse thermogravimétrique ATG-DTG

Pour soutenir les résultats obtenus par les analyses DRX, le test de l'indice d'activité pouzzolanique et les propriétés mécaniques, une série de test ATG-DTG a été réalisé afin de mettre en évidence les propriétés pouzzolaniques de la vase calcinée comparées à celles des cendres volantes. Ces tests visaient à mesurer approximativement la consommation de la Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). À cet effet, des pâtes de liant ont été mélangées à base de 22% de la vase calcinée ou des cendres volantes avec deux rapports $E/L=0.39$ et $E/L=0.47$. Les mélanges ont été placés dans des sacs hermétiques à 20°C et 50% d'humidité relative jusqu'à 300 jours. Les échantillons ont été chauffés dans un creuset platine jusqu'à 1000°C sous atmosphère inerte d'argon et à une vitesse de chauffage de $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Les courbes ATG-DTG résultantes sont présentées dans la figure I.7.

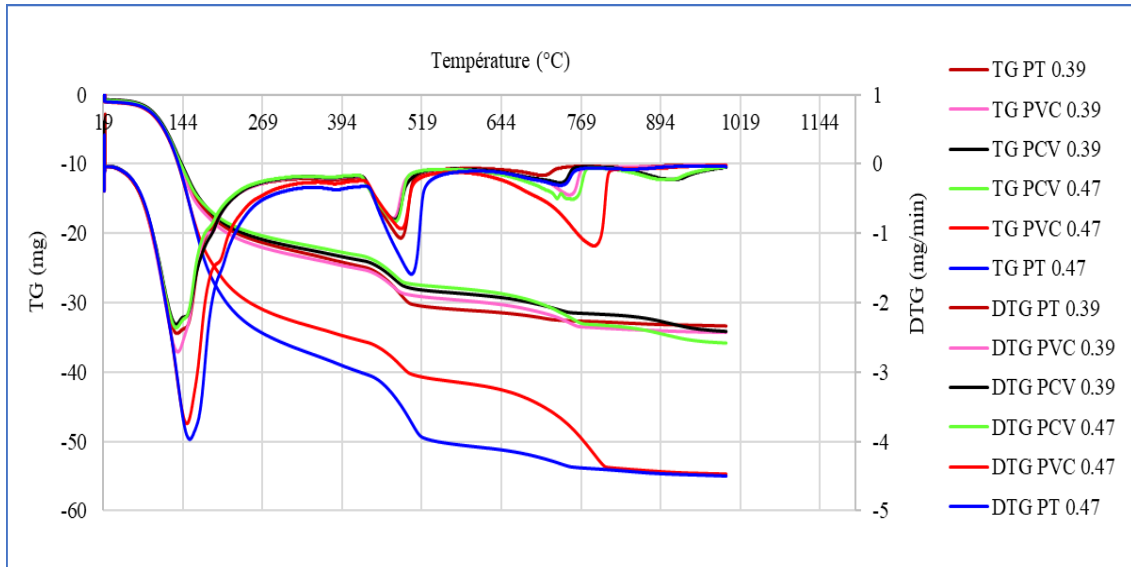


Figure I.7. Analyse thermogravimétrique des pâtes de liant étudiées

L'analyse thermogravimétrique (ou thermopondérale « ATG ») permet d'approcher les quantités globales d'hydrates du matériau (figure I.8). De plus, il est possible, moyennant certaines hypothèses, d'estimer une quantité de C-S-H, d'aluminates de calcium hydratés et de portlandite, à partir de la courbe de perte de masse au cours du temps.

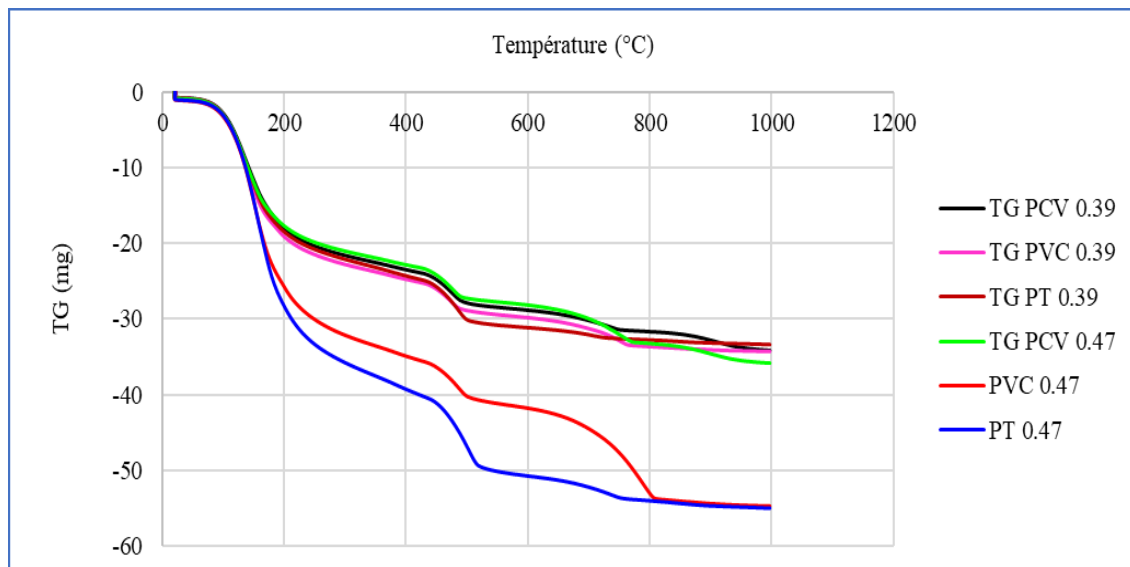


Figure I.8. Évolution de la masse des pâtes de liant au cours de l'ATG

À travers les résultats affichés sur la figure I.8, les pertes de masses correspondant à la décomposition de la calcite ainsi que la portlandite contenues dans les échantillons sont données dans le tableau I.4 suivant :

Tableau I.4. Pertes de masses des pâtes de liant de l'étude

Pâtes de liant	Perte de masse portlandite absolue (mg) (390°C-600°C)	Perte de masse calcite absolue (mg) (600°C-900°C)
PT 0.39	6.85	2.02
PVC 0.39	5.08	4.24
PCV 0.39	5.35	3.97
PT 0.47	11.46	3.94
PVC 0.47	6.88	12.6
PCV 0.47	5.31	6.43

Les courbes DTG sont obtenues en dérivant les courbes d'analyse thermo-pondérale en fonction du temps et en les reportant dans un graphe en fonction de la température (figure I.9).

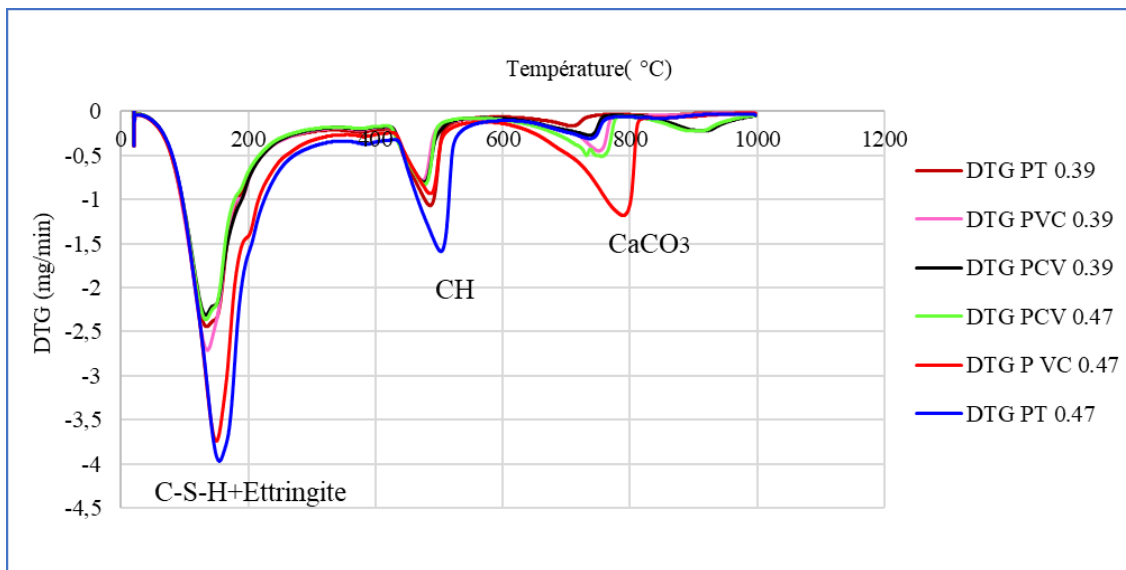


Figure I.9. Dérivées des pertes de masse des pâtes de liant étudiées

D'après la figure I.9, les résultats des analyses DTG permettent plusieurs commentaires. Pour toutes les pâtes de liant âgées de 10 mois on distingue clairement trois pics dans l'intervalle de température de 19 à 900°C :

- 1^{er} pic : de 19 à 300°C, dû à l'évaporation, à la fois, de l'eau libre et de l'eau liée aux silicates de calcium hydratés (C-S-H)
- 2^{ème} pic : de 390°C à 600°C, qui correspond à la déshydroxylation de la Portlandite [18-20].
- 3^{ème} pic : de 600°C à 900°C, qui correspond à la décarbonatation de la calcite CaCO_3

Nous pouvons constater sur la figure I.9 que les six mélanges ont différents comportements. Avec le rapport $E/L = 0.39$, nous notons que la teneur en C-S-H pour la pâte contenant de la vase calcinée est supérieure à celle des autres pâtes, ceci explique la plus grande résistance à la compression pour les mortiers contenant la vase calcinée en comparaison avec les mortiers contenant des cendres volantes (voir le chapitre II suivant), contrairement au pic qui se situe entre 400°C et 600°C, qui correspond à la teneur en Portlandite qui est plus faible pour le mélange à base de vase calcinée que pour le mélange témoin et à base des cendres volantes. Cela peut être expliqué par sa consommation par réaction pouzzolanique, donc il est clair que le mortier avec les cendres volantes est moins réactif que le mortier de ciment mélangé par la vase calcinée. Le pic entre 600°C et 800°C correspond à la teneur en calcite, qui représentait la plus grande valeur dans la pâte contenant de la vase calcinée, suivie de la pâte contenant des cendres volantes, elle est presque inexistante dans la pâte de référence, c'est ce que nous avons vu dans les analyses DRX.

Avec $E/L = 0.47$, nous observons que la teneur en C-S-H pour les deux pâtes de référence et de vase calcinée est presque similaire en comparaison avec la pâte des cendres volantes, qui représente la teneur la plus faible, quant au le pic qui se situe entre 400°C et 600°C, il correspond à la teneur en Portlandite, est supérieure pour le mélange témoin que pour les deux autres mélanges. Le pic entre 600°C et 900°C correspond à la teneur de la calcite, qui représentait la plus grande valeur dans la pâte contenant de la vase calcinée, cela est peut-être comme les résultats de DRX, suivie de la pâte contenant des cendres volantes et très peu dans la pâte de référence.

I.3.4. Analyse MEB-EDS

Dans cette partie, une description générale de la microstructure des pâtes de liant est présentée par des images au MEB. Les mélanges ont été placés dans des sacs hermétiques à 20°C et 50% d'humidité relative jusqu'à échéance (12 mois) de passage à l'analyse MEB-EDS. Un ensemble d'observations est présenté sur les figures I.10 à I.19 sur la microstructure dans la

pâte durcie. Des spectres donnant les éléments chimiques des surfaces analysées sont présentés également.

Les images (a) sont celles prises en mode électron rétrodiffusé (BSE) et les images (b) sont celles prises en mode électron secondaire (SE).

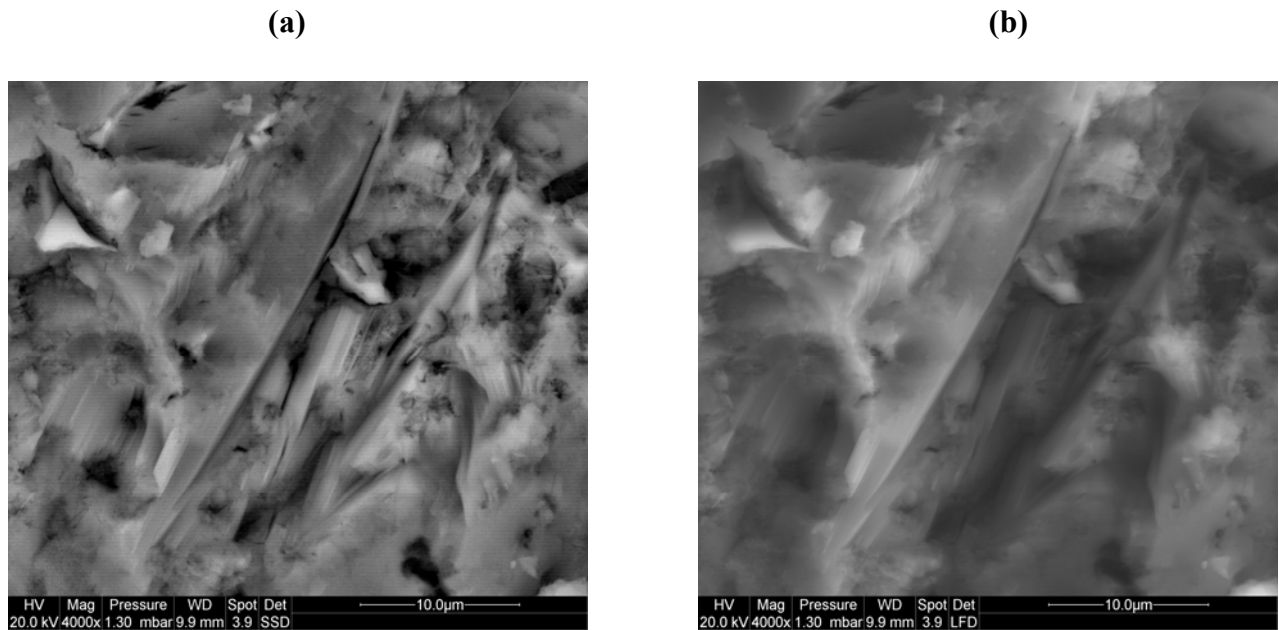


Figure I.10. Images SE et BSE de la microstructure de PT 0.39, grossissement 4000×

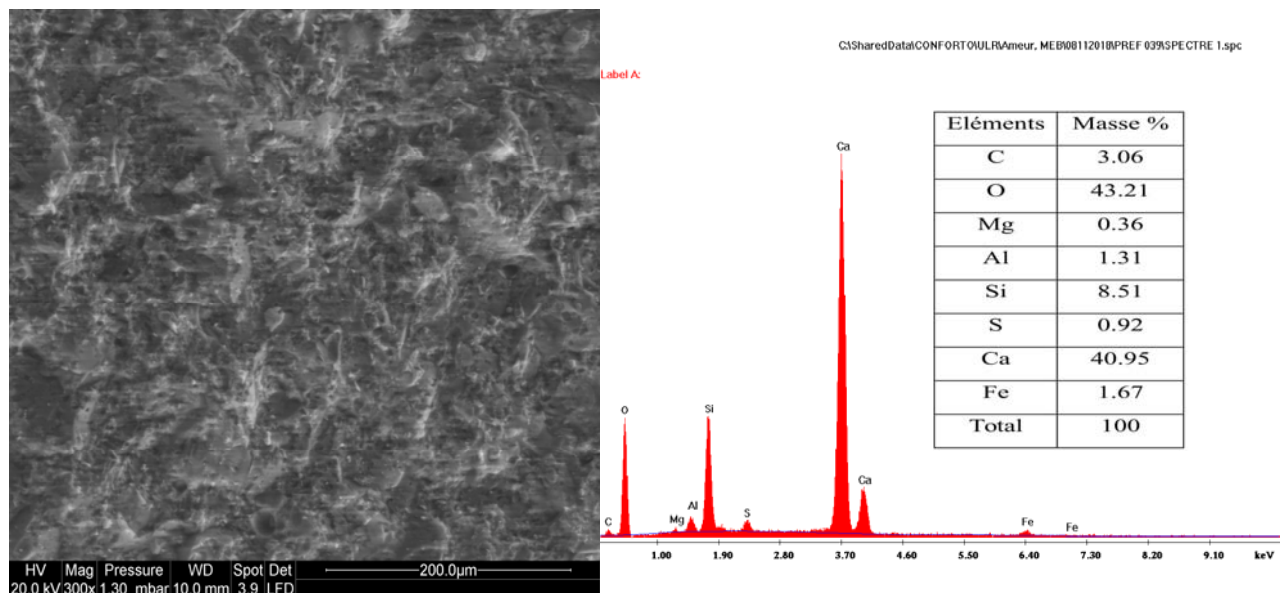


Figure I.11. Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques de PT 0.39 d'une surface $480 \times 390 \mu^2$, grossissement 300 x

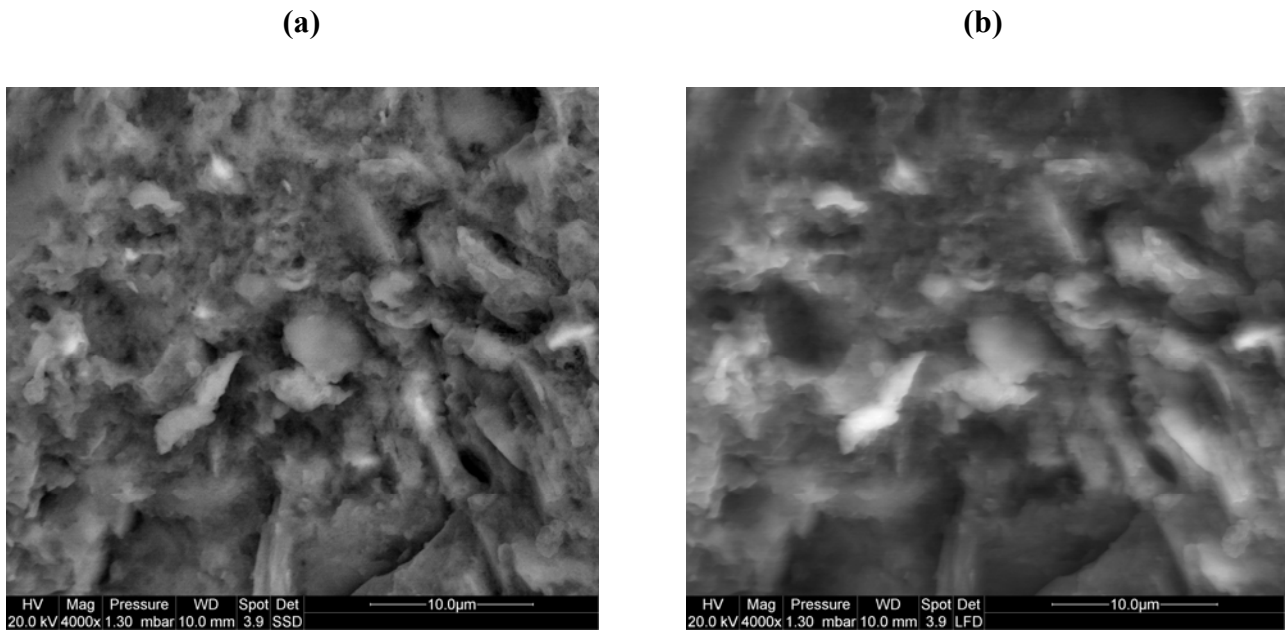
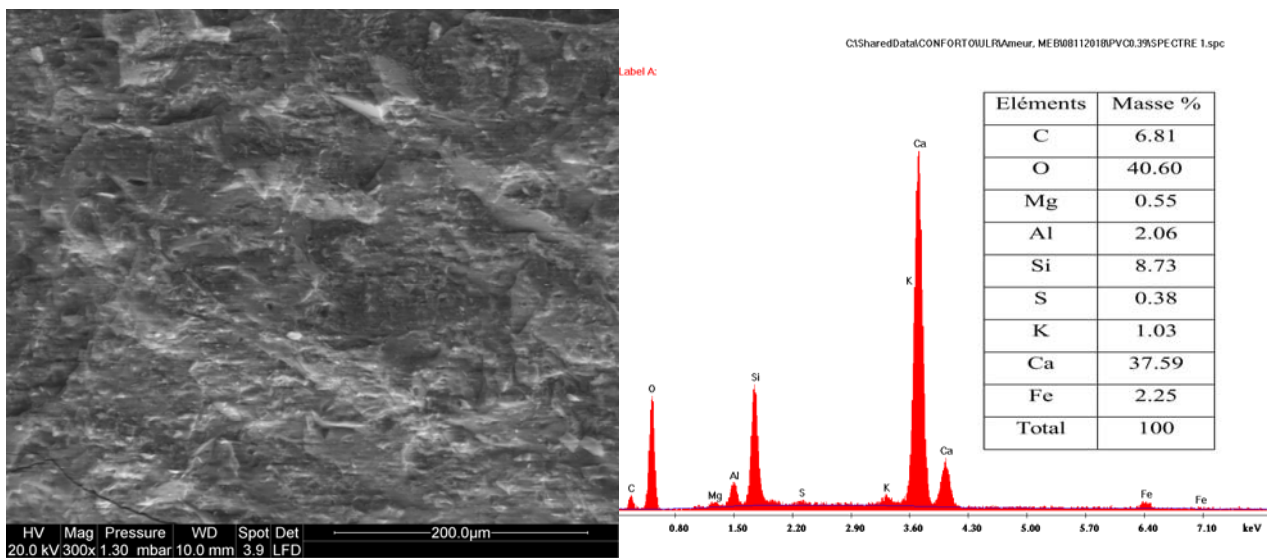


Figure I.12. Images SE et BSE de la microstructure de PVC 0.39, grossissement 4000×

Figure I.13. Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques de PVC 0.39 d'une surface $480 \times 390 \mu^2$, grossissement 300×

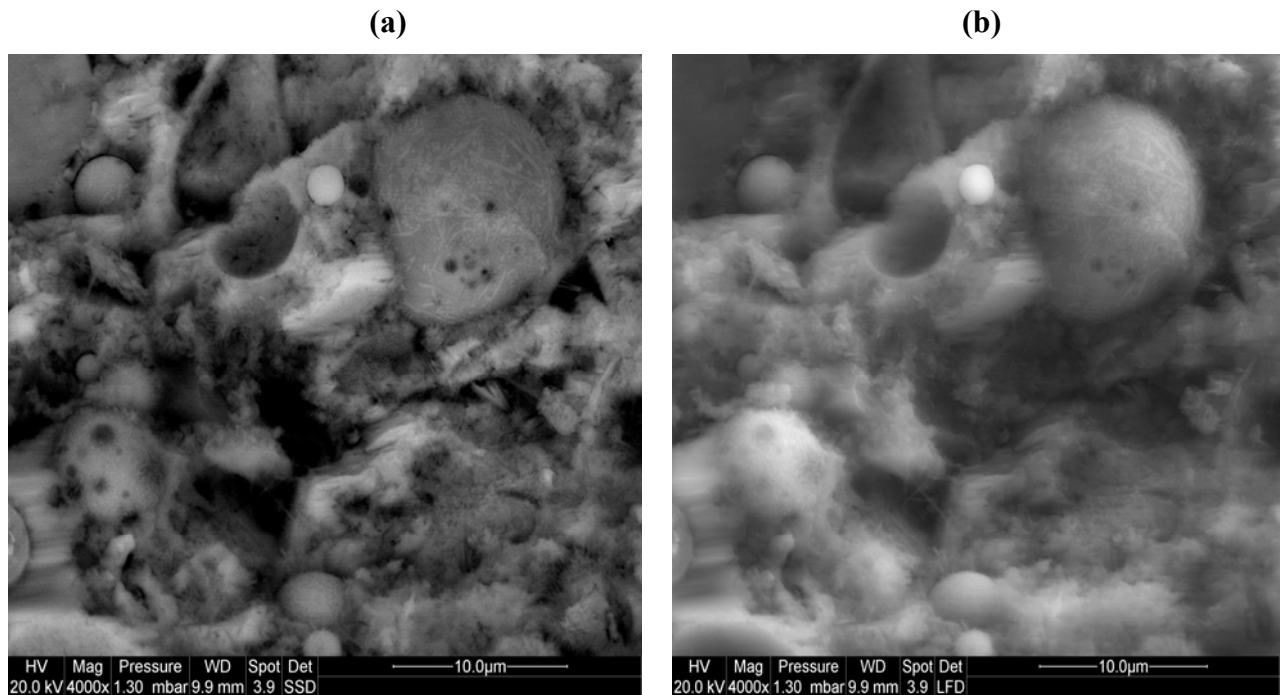
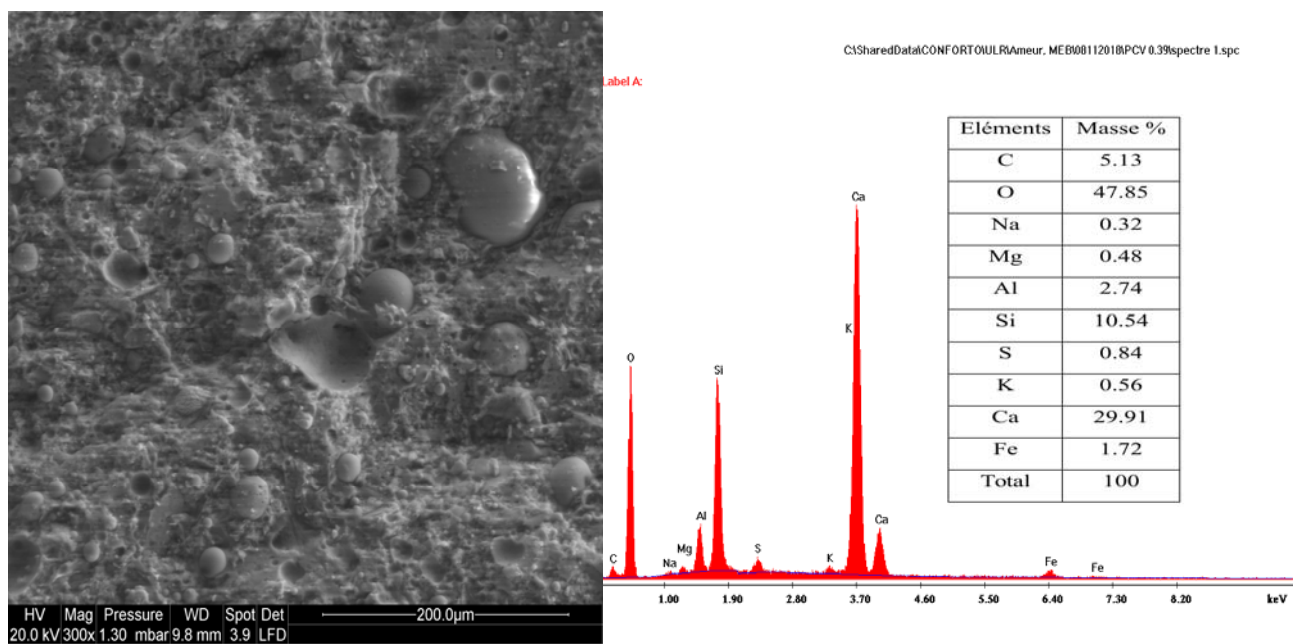


Figure I.14. Images SE et BSE de la microstructure de PCV 0.39, grossissement 4000×

Figure I.15. Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques de PCV 0.39 d'une surface $480 \times 390 \mu^2$, grossissement 300×

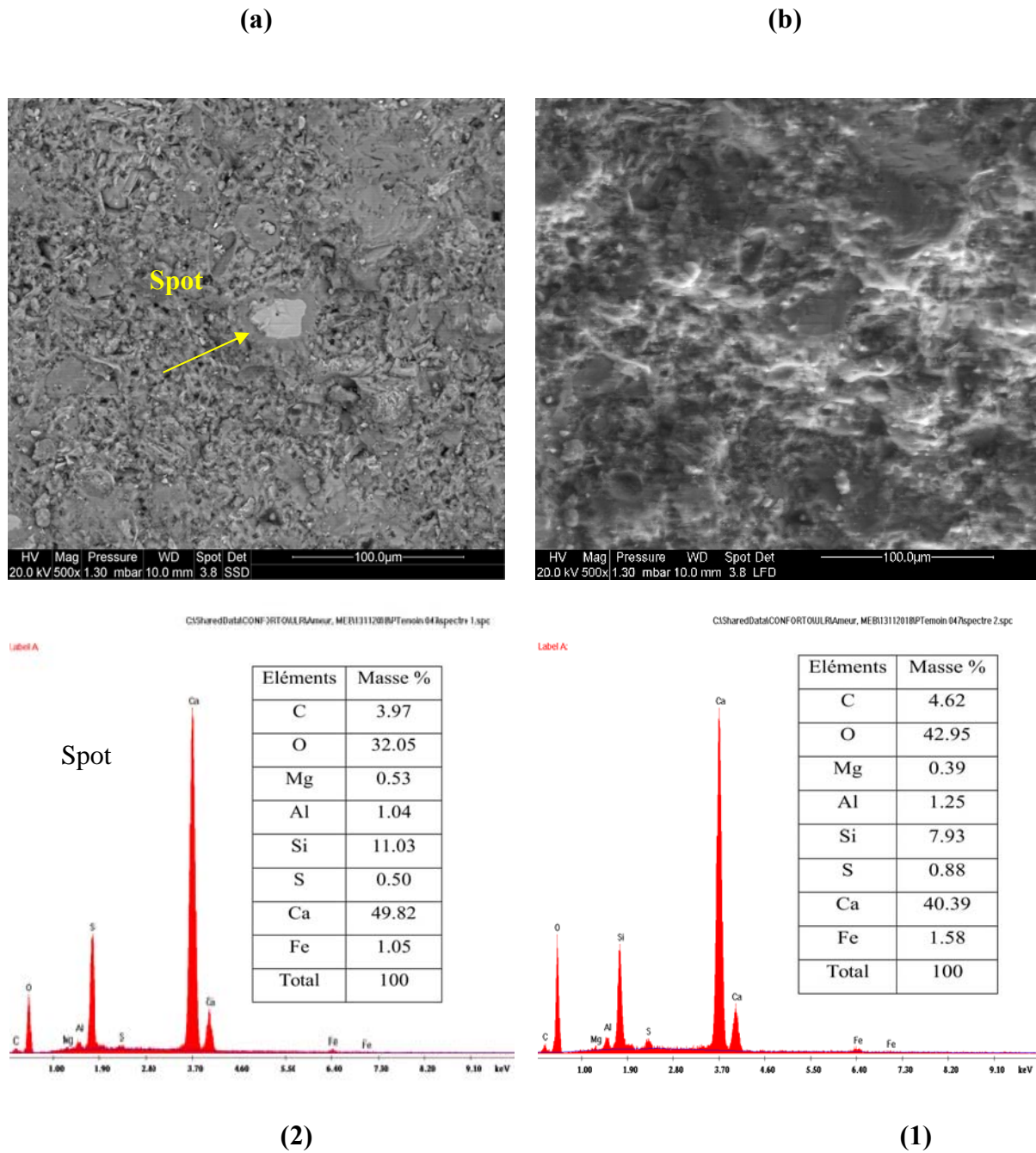


Figure I.16. (1) : Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques de PT 0.47 d'une surface de $300 \times 300 \mu^2$, grossissement $500\times$, (2) : Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques du spot, grossissement $500\times$

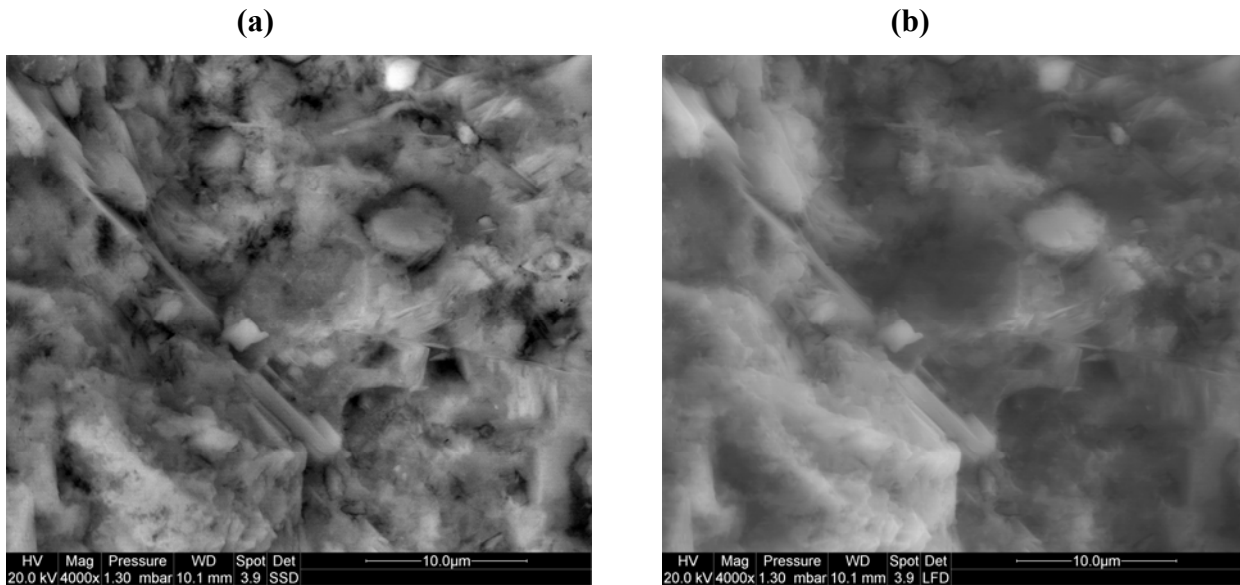
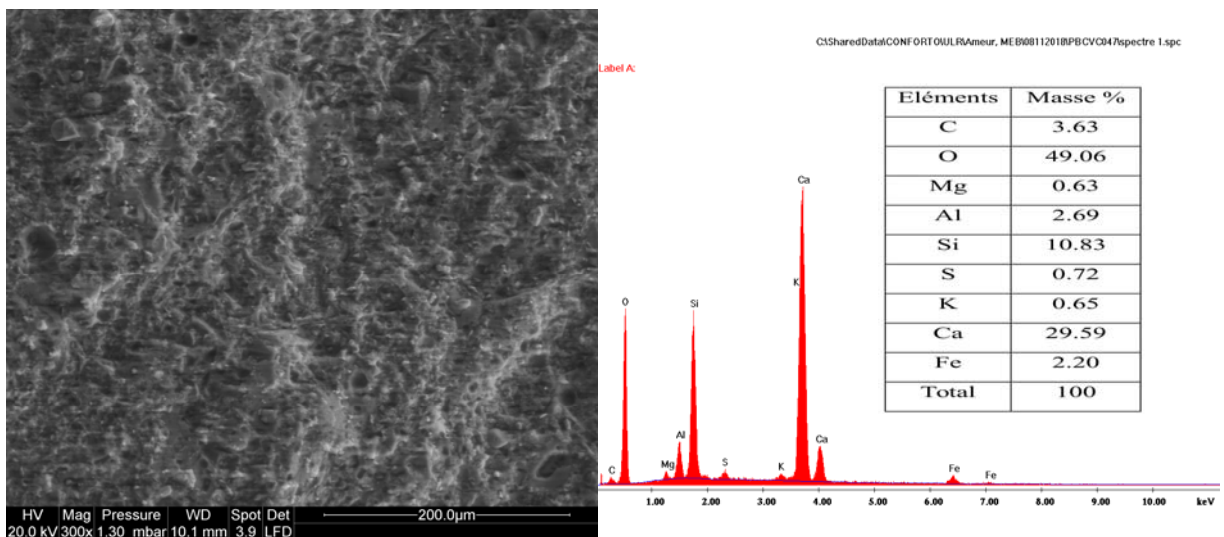


Figure I.17. Images SE et BSE de la microstructure de PVC 0.47, grossissement 4000×

Figure I.18. Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques EDS de PVC 0.47 d'une surface $480 \times 390 \mu^2$, grossissement 300×

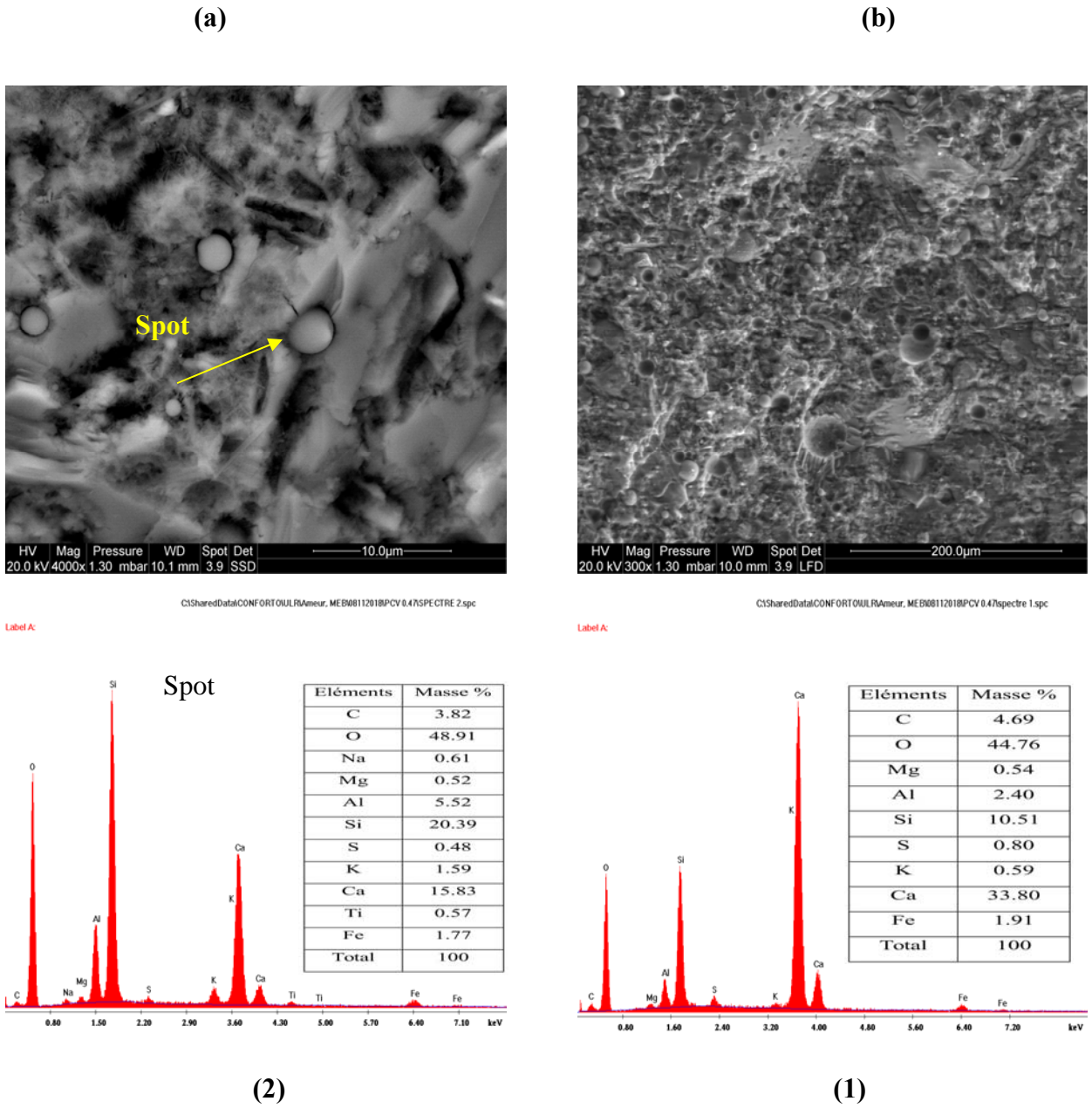


Figure I.19. **(1)** : Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques EDS de PCV 0.47 d'une surface $480 \times 390 \mu^2$, grossissement 300×, **(2)** : Image MEB et la microanalyse d'éléments chimiques du spot, grossissement 4000×

La caractérisation de l'état microstructural des pâtes de liant est effectuée à l'âge de 12 mois et à deux différents rapports E/L (0.39 et 0.47). Les observations microscopiques montrent d'abord une microstructure homogène et dense dans les pâtes de références et à base de vase calcinée. Cette homogénéité et cette densification des pâtes contenant de la vase calcinée peut être expliqué par l'effet physique de cette dernière suite à sa grande finesse ($8310\text{cm}^2/\text{g}$). La densification de ces pâtes induit une porosité plus fine. En revanche une microstructure hétérogène dans les pâtes à base des cendres volantes, cette hétérogénéité est plus prononcée dans le cas de la pâte PCV 0.39 (figure I.14). Ce phénomène est probablement dû à l'insuffisance d'eau dans la matrice.

Par ailleurs, il a été observé la présence de nombreux grains anhydres de cendres volantes dans les pâtes (PCV 0.39 et PCV 0.47) montrant leur faible réactivité d'hydratation (figure I.14 et I.19). Ces observations sont en accord avec les résultats obtenus par les analyses DRX, le test de l'indice d'activité pouzzolanique, teneur en eau liée et libre et les propriétés mécaniques (étudiées dans le chapitre suivant).

Les observations au MEB permettent de rendre compte de la microstructure des pâtes et de la porosité. En effet, on peut constater la présence d'une porosité relativement importante dans les pâtes de liant à base de sédiment traité et à base des cendres volantes, en revanche une microstructure dense avec peu de porosité est observée pour les pâtes de références (voir chapitre III suivant).

L'analyse chimique de toutes les pâtes de liant et avec les deux rapports E/L= 0.39 et 0.47 révèle la présence de calcium, d'oxygène, de silicium et de carbone en grande partie ainsi que la présence d'autres éléments (Al, Mg, Si, S, Fe, Ti.).

I.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, ont été exposés les résultats des mesures de l'état frais réalisés sur les différentes formulations. L'influence du type de liant sur l'étalement, le temps de prise, sur la teneur en eau liée et libre, analyse DRX, observation MEB-EDS et analyse ATG-DTG a été montrée.

Les résultats des mesures d'eau liée ont montré que les MBAPE avec additions indiquent clairement une activité pouzzolanique importante de la pâte à base de vase calcinée comparée à celle de la pâte à base des cendres volantes, résultats qui corroborent bien avec les analyses DRX, analyse ATG-DTG et observations au MEB -EDS.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] FNARC «Specification and guidelines for self-compacting concrete». 29–35. Free pdf copy downloadable from. <http://www.efnarc.org>. 2002.
- [2] GU NEYISI E., GESOG LU M., «Properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and metakaolin». Mater. Struc. 41:1519–1531. Doi 10.1617/s11527-007-9345-7. 2008.
- [3] AYED K., BENAÏSSA A., VIDAL T., and PONS G., « Étude du retrait et du fluage des bétons autoplaçants à base de pouzzolanes naturelles et de fines siliceuses algériennes ». RC Research Press, Doi: 10.1139/L11-116, 2011.
- [4] BERNARDINI C., « Les bétons autoplaçant ». Presses des Ponts, Paris, (2011).
- [5] MOSTEFA F., « Étude du comportement d'un béton Autoplaçant à base de sédiment de dragage vis-à-vis du retrait ». Mémoire de Magister, Université des sciences et de technologie, Mostaganem, 23Février, (2012).
- [6] NIK N.D., « Contribution à l'étude du comportement mécanique, du retrait et des propriétés de transport des bétons autoplaçants avec additions minérales, approche numérique et expérimentale ». PhD thèse de doctorat. INSA de Rennes, France, 2015.
- [7] JIANG S. and VAN DAMME H., « Influence des fillers de nature différente sur l'hydratation et la texture des pâtes de C3S ». Rapport de CRMD-ATILH, Université d'Orléans, 1996.
- [8] BELGUESMIA K., BELAS BELARIBI N., AMIRI O., LEKLOU N., BELARIBI O., «Influence of treated sediment substitution percentage on workability», strength and porosity of SCC. J. Mater. Eng. Struc. 5, 47–55. 2018.
- [9] GENDRON F., TURCRY P., AÏT-MOKHTAR A., «Coefficient of diffusion of CO₂ from cement pastes - experimental study of the influence of the nature of the binder and accelerated carbonation», 23rd French Congress of Mechanics, Lille, August 28th to September 1st 2017. <http://hdl.handle.net/2042/63471>.
- [10] SIAD H., « Influence du type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants ». Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 2010.
- [11] BARON J., GAGNE R., OLLIVIER J.P., « Chapitre 11 – Viser la durabilité », dans ATILH, sous la direction de J. Baron et J.-P. Ollivier. Les Bétons. Bases et données pour leur formulation, Ed.Eyrolles, Chapitre 11, pp. 307-363, 1996.

[12] **ROZIERE E.**, « Étude de la durabilité des bétons par une approche performancielle ». Thèse de doctorat, l'École Centrale de Nantes, 2007.

[13] **AUDENAERT K., BOEL V., DE SCHUTTER G.**, «Chloride migration in self-compacting concrete». Proceedings of the 5th International Conference on Concrete under Severe Conditions Environment and Loading CONSEC'07 Tours, France, 291-298. 2007.

[14] **DINAKAR P., BABU K G., SANTHANAM M.**, «Corrosion resistance performance of high-volume fly-ash self-compacting concretes». Magazine of Concrete Research 2009, vol. 61, n°2, pp. 77-85.

[15] **BASSUONI M.T., NEHDI M., AMIN M.**, « Self-compacting concrete: using limestone to resist sulfuric acid». Proceedings of the Institution of Civil Engineers Construction Materials, 2007, Issue CM3, No, 160, pp113-123.

[16] **FRACHEBOURG J.**, « Contribution à l'étude de quelques Pouzzolanes naturelles et artificielles en vue de la fabrication des ciments de Pouzzolanes ». Thèse Doctorat Es Sciences, École Polytechnique, Université de Lausanne 1965, 136p.

[17] **MESSI A.**, « Propriétés des ciments pouzzolaniques élaborés à partir de latérites activées thermiquement ». Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 1988, 256 p.

[18] **MOUNANGA P.**, « Étude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermophysiques ». Thèse doctorat, Université de Nantes. p.245. 2003.

[19] **LCPC.**, « Méthodes d'essai des LPC n°62 : présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie ». Technique et méthodes des Laboratoire des Ponts et Chaussées, France. 2005.

[20] **NGUYEN V.H.**, «Quantification of the hydrate product of cement by the thermogravimetric analysis method». Journal of Science and Technology. The University of DaNang. Vol.01, n°62, p.79–84. 2013.

CHAPITRE II.

RÉSULTATS ET ANALYSE DES RÉSISTANCES MÉCANIQUES

CHAPITRE II. RÉSULTATS ET ANALYSE DES RÉSISTANCES

MÉCANIQUES

II.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons essayer de comprendre l'influence de la vase calcinée et des cendres volantes sur les résistances mécaniques des MBAPE étudiés. Six formulations de mortier ont été optimisées et mises en œuvre. Elles ont été caractérisées par des essais de flexion et de compression simple à différentes échéances (3, 7, 14, 28 et 90 jours).

II.2. INDICE D'ACTIVITÉ DE LA VASE CALCINÉE ET DES CENDRES VOLANTES

Pour quantifier l'activité pouzzolanique des additions, sédiment traité et cendres volantes, vis-à-vis de la résistance mécanique, les indices d'activité de ces additions ont été mesurés à 28 et 90 jours. Pour cela, nous avons fabriqué des prismes de mortier $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ avec un rapport E/C de 0.5 et une substitution du ciment Portland par 25% de vase calcinée et 25% des cendres volantes selon la norme (EN 196-1, 2006). Ces prismes ont été ensuite testés en flexion et compression. L'indice d'activité noté « i » est défini comme le rapport des résistances en compression $f_p(t)$ et $f_0(t)$, avec f_p est la résistance du mortier contenant une fraction p d'addition et f_0 la résistance du mortier témoin (sans addition) [1].

Le tableau II.1 récapitule les différents indices d'activité qui correspond à l'âge du 28 et 90 jours.

Tableau II.1. Indices et coefficients d'activité des additions utilisées

Additions	Echéances (jours)		Indice d'activité i	
	28	90	0.93	0.94
Vase calcinée	28	90	0.93	0.94
Cendres volantes	28	90	0.79	0.87

La figure II.1 présente les résultats des mesures de l'indice d'activité et montre que l'indice de la vase calcinée est supérieur à l'indice des cendres volantes, ce qui probablement aura un effet positif sur le développement de la résistance mécanique.

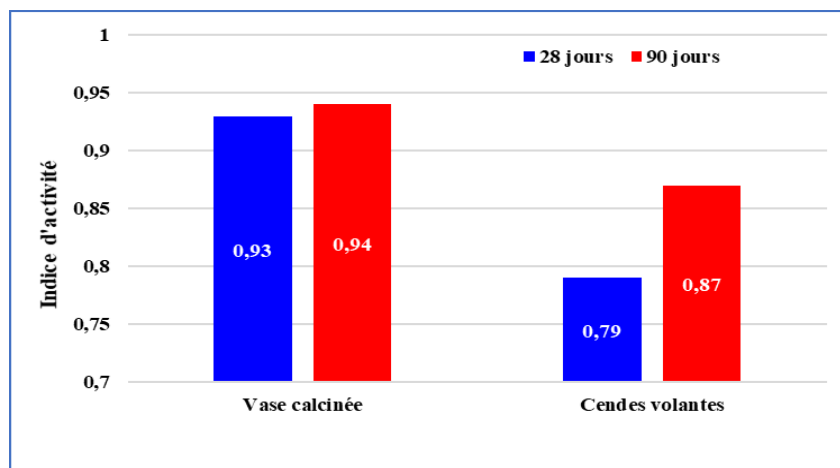


Figure II.1. Indice d'activité de la vase calcinée et des cendres volantes

II.3. INFLUENCE DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du mortier et l'un des paramètres fondamentaux de notre étude, sa détermination est essentielle pour caractériser la réussite de la valorisation des sédiments traités. Cette grandeur est le premier paramètre requis pour qualifier un matériau à base de ciment. Le critère de comparaison choisi dans notre recherche étant les additions minérales (vase calcinée et cendres volantes), il était donc primordial de choisir des formulations de mortiers contenant une addition minérale ayant de meilleures résistances en compression. Les résultats présentés dans cette section sont basés sur des tests expérimentaux réalisés sur différentes formulations des MBAPE. Cette résistance mécanique a été déterminée à différentes échéances (3, 7, 14, 28 et 90 jours) par la moyenne des résistances d'une série de trois échantillons prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ suivant la norme EN 196-1. Les valeurs des résistances en compression moyennes des différents mortiers sont données dans le tableau II.2.

Tableau II.2. Valeurs des résistances à la compression des MBAPE étudiés

Âge (jours)	Résistance à la compression (MPa)					
	MBAPET 0.39	MBAPEVC 0.39	MBAPECV 0.39	MBAPET 0.47	MBAPEVC 0.47	MBAPECV 0.47
3	51.74	41.11	40.00	42.11	32.97	32.55
7	68.34	58.52	53.16	53.15	45.04	42.43
14	72.48	64.86	59.16	56.83	53.86	43.30
28	97.37	76.86	72.59	63.93	60.42	56.76
90	101.10	78.02	74.35	72.90	65.12	60.54

L'évolution de la résistance en compression en fonction du temps est donnée par la figure II.2. D'après les résultats obtenus, le MBAPET avec les deux rapports E/L= 0.39 et 0.47 affiche de bonnes performances mécaniques par rapport aux MBAPEVC et MBAPECV.

Selon la nature de l'addition, le MBAPEVC a développé de meilleures résistances par rapport au MBAPECV, cela peut être expliqué également par la propriété latente de l'hydratation des ciments contenant des cendres volantes [2]. La cinétique de développement des résistances du MBAPEVC s'explique par l'activité de la vase et par le fait que l'action pouzzolanique devient sensible à partir de jeune âge pour se déclencher et fixer la chaux libérée par le ciment au cours de son hydratation pour former de nouveaux silicates de calcium hydratés qui participent à la résistance [3].

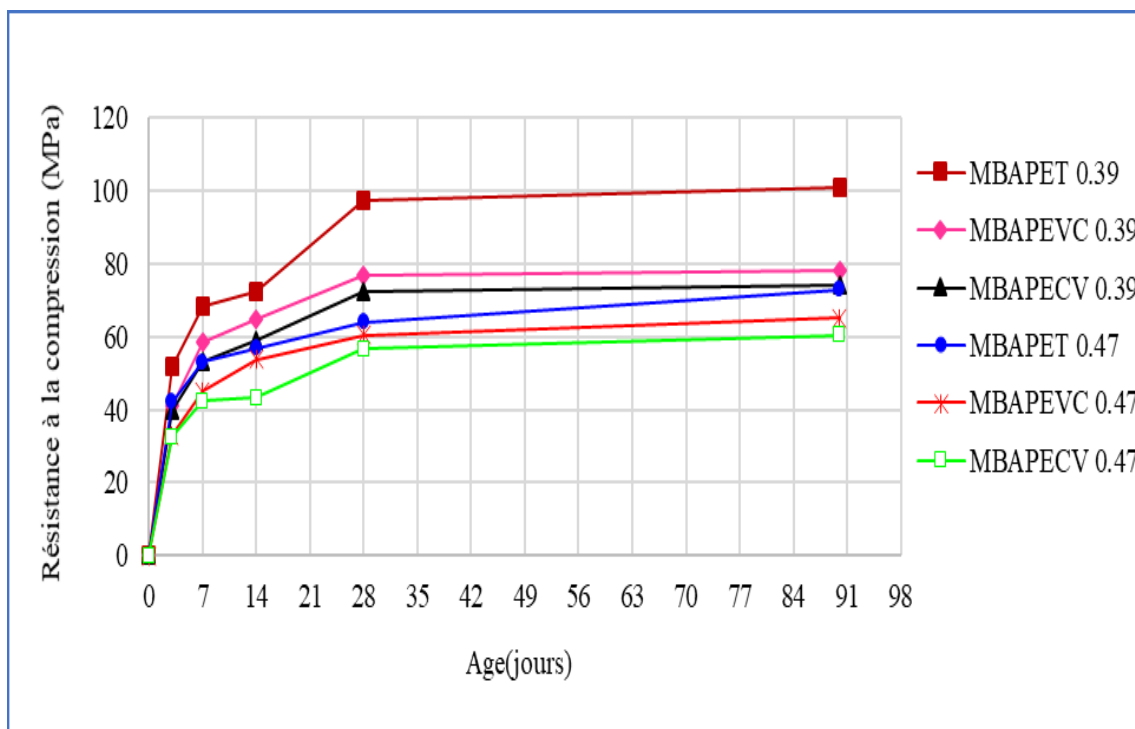


Figure II.2. Évolution des résistances à la compression en fonction du temps

Les résultats des mesures des résistances à la compression montrent que la nature d'addition minérale influe significativement sur la résistance en compression (figure II.3). À 28 jours, on constate pour le MBAPET 0.39 un gain de résistance en compression de 21 % et 25 % par rapport à celles des MBAPEVC 0.39 et MBAPECV 0.39 respectivement. Cette hausse de résistance est due principalement au faible rapport $E/L = 0.39$ et par la cinétique la plus rapide dans le cas du MBAPET 0.39 dont le volume d'hydrates obtenu est supérieur à celui développé dans le MBAPECV 0.39 et MBAPEVC 0.39 [4]. Quant au MBAPET 0.47 il présente un gain de résistance de 5.5 % et 11.2 % par rapport à celles des MBAPEVC 0.47 et MBAPECV 0.47 respectivement. Il en résulte donc une plus grande densification du gel. En effet, moins de ciment implique non seulement moins d'hydrates mais aussi moins de portlandite et par conséquent moins de réaction pouzzolanique [5].

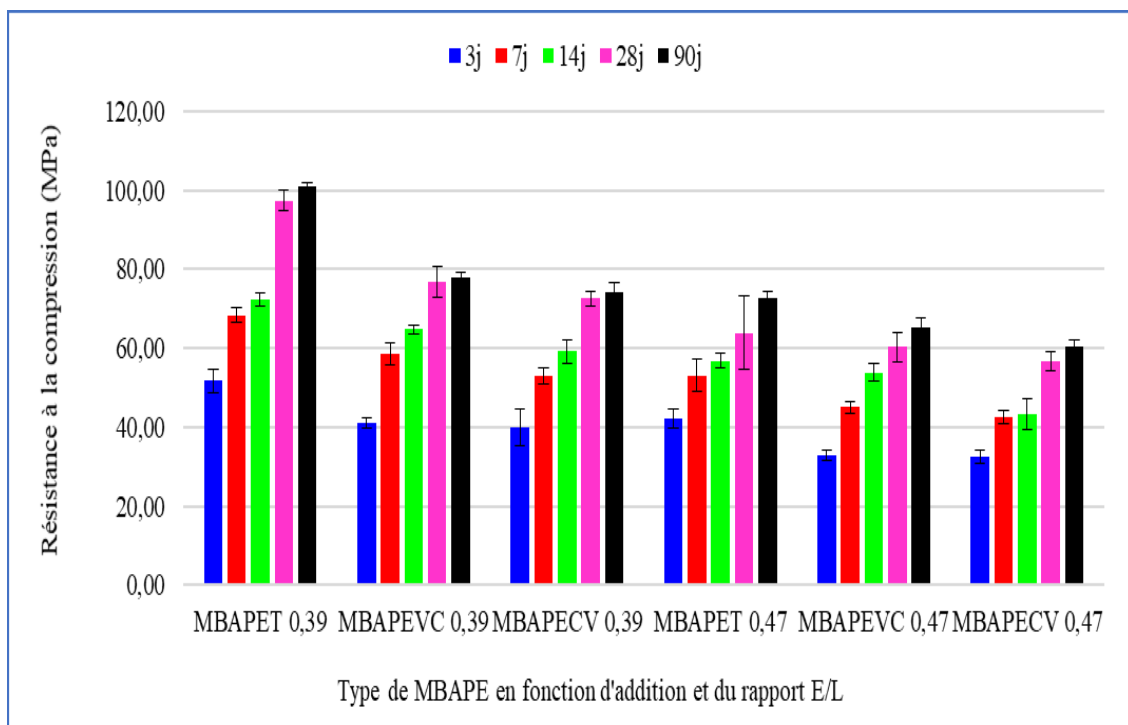


Figure II.3. Histogramme d'évolution des résistances à la compression en fonction de la nature de liant et du rapport E /L

Selon la nature des additions, à 28 jours, on constate un gain de résistance pour le MBAPEVC 0.39 de l'ordre de 5.55 % par rapport au MBAPEVC 0.39 et un gain de résistance pour le MBAPEVC 0.47 de l'ordre de 6.1% par rapport au MBAPEVC 0.47. Cela peut être expliqué par l'effet physique de la vase calcinée suite à sa grande finesse ($8310 \text{ cm}^2/\text{g}$) en comparaison aux cendres volantes ($4334 \text{ cm}^2/\text{g}$). En effet Sabir et al [6] a montré que la finesse, la morphologie des particules est également un paramètre influent sur l'intensité de l'activité pouzzolanique. Aussi, 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 [7,8]. La vase calcinée a tout d'abord un effet accélérateur et ses grains agissent comme des sites de nucléation, et la probabilité que les CSH (silicate de calcium hydrate) dissous rencontrent des particules solides est alors augmentée [9]. Aussi l'indice d'activité de la vase calcinée est de 0.93 en comparaison avec 0.79 de cendres volantes, ce qui est signe

d'une forte activité pouzzolanique. Expérimentalement, des échantillons de vase ont été calcinés à une température inférieure à 800°C et ont montré des structures amorphes qui ont réagi avec la chaux pour donner des CSH de même type que ceux des réactions pouzzolaniques [10]. La substitution d'un certain pourcentage de pouzzolane calcinée au ciment Portland qui va réagir avec la chaux libérée lors de son hydratation, permet d'obtenir des résistances égales voire meilleures que le ciment seul [11]. En effet K. Ouhba [12] a montré que le mélange composé de 70 % de ciment et 30% de vase calcinée à 750°C, présente des résistances mécaniques relativement élevées qui avoisinent celle du ciment (CEMI). Ces résistances sont les résultats de l'hydratation du ciment d'une part et la réaction pouzzolanique du mélange d'autre part. Cette dernière se manifeste encore d'avantage à partir de 90 jours de conservation et donne ainsi des meilleures résistances à la compression pour les mortiers à base de vase calcinée par rapport aux mortiers contenant des cendres volantes. En effet, à 90 jours, les MBAPEVC présentent des résistances à la compression supérieures à celles obtenues sur le MBAPECV ayant le même rapport E/L. Des écarts ont été observés, où une différence de 3.7 MPa a été enregistrée entre le MBAPEVC 0.39 et le MBAPECV 0.39 et de 4.6 MPa entre le MBAPEVC 0.47 et MBAPECV 0.47.

Concernant l'influence de E/L d'après la figure II.3, il est nettement visible que la résistance mécanique à la compression de tous les mortiers durcis à tout âge décroît avec l'augmentation du rapport E/L.

Pour mieux analyser les cinétiques de durcissement des mortiers étudiés, nous avons choisi la notion de résistance relative (R_{cj}/R_{c28}) pour les différentes formulations.

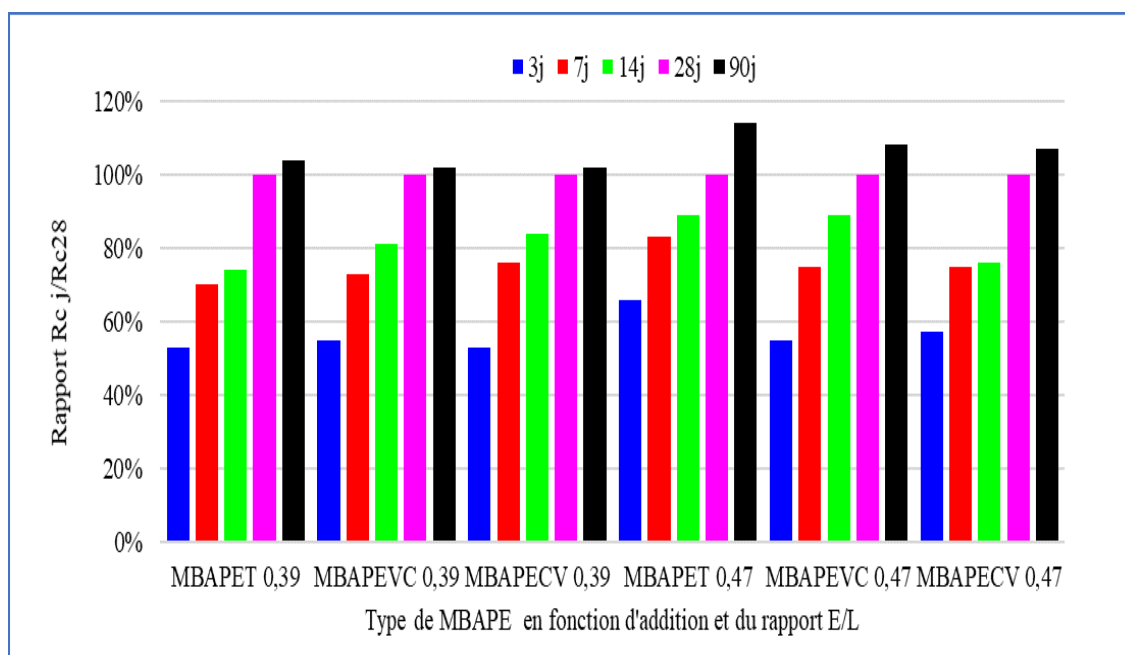
Le tableau II.3 donne la résistance relative des mortiers aux différentes échéances.

Dans la figure II.4 nous remarquons que le MBAPET atteint respectivement 74 % de sa résistance à la compression à 28 jours pour l'échéance de 14 jours avec le rapport E/L=0.39 et 89% de sa résistance à la compression à 28 jours avec le rapport E/L=0.47. Or le MBAPEVC 0.39 et le MBAPEVC 0.47 atteignent respectivement 81% et 89% de leur résistance en compression à 28 jours pour l'échéance de 14 jours. Quant aux MBAPECV 0.39 et MBAPECV 0.47, ils atteignent respectivement 84 % et 76% de leur résistance en compression à 28 jours pour l'échéance de 14 jours. Cette divergence entre les valeurs en faveur des mortiers contenant les deux additions minérales (vase calcinée et cendres volantes) s'attribue à la densification et compacité de la matrice cimentaire due à la substitution du

ciment par ces deux ajouts pouzzolaniques. Les particules fines des deux additions ont un effet filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, elles 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. Ainsi, la résistance à la compression a été largement améliorée suite à la production des C-S-H supplémentaires qui rendent la microstructure des MBAPE à base des additions minérales plus dense et diminuent leurs porosités capillaires [13,14].

Tableau II.3. Cinétique de développement des résistances à la compression

R _{cj} / R _{c28} (de même MBAPE)	0,39	0,39	0,39	0,47	0,47	0,47
R _{c3} /R _{c28}	0.53	0.55	0.53	0.66	0.55	0.57
R _{c7} /R _{c28}	0.7	0.73	0.76	0.83	0.75	0.75
R _{c14} /R _{c28}	0.74	0.81	0.84	0.89	0.89	0.76
R _{c28} /R _{c28}	1	1	1	1	1	1
R _{c90} /R _{c28}	1.04	1.02	1.02	1.14	1.08	1.07

Figure II.4. Histogramme évolution de Rc_j par rapport à Rc₂₈

À partir du tableau II.4 qui schématise ces rapports entre les résistances des MBAPE (VC, CV) j et MBAPET_j, nous pouvons constater que ce sont les mortiers contenant la vase calcinée qui développe les meilleures performances par rapport aux mortiers contenant les cendres volantes (figure II.5).

Tableau II.4. Rapports des résistances à la compression Rc_j (MBAPE (VC, CV)) / Rc_j (MBAPET)

Âge (jours)	Rc _j (MBAPE (VC, CV)) / Rc _j (MBAPET)					
	MBAPET 0.39	MBAPEVC 0.39	MBAPECV 0.39	MBAPET 0.47	MBAPEVC 0.47	MBAPECV 0.47
3	1	0.79	0.77	1	0.78	0.77
7	1	0.86	0.78	1	0.85	0.80
14	1	0.89	0.82	1	0.95	0.76
28	1	0.79	0.75	1	0.95	0.89
90	1	0.77	0.74	1	0.89	0.83

Pour mieux visualiser l'évolution de la résistance à la compression, nous comparons les différents rapports des MBAPE à base des ajouts minéraux (vase calcinée et cendre volante) aux MBAPET avec les deux rapports E/L (figure II.5). Elle augmente pour le MBAPEVC comparé au MBAPET. À 28 jours, le MBAPEVC 0.39 et MBAPEVC 0.39 présentent respectivement des résistances en compression 25% et 21% moins que celle du MBAPET 0.39, quant aux MBAPEVC 0.47 et MBAPEVC 0.47 ils présentent respectivement des résistances en compression, 5% et 11% moins que celle du MBAPET 0.47.

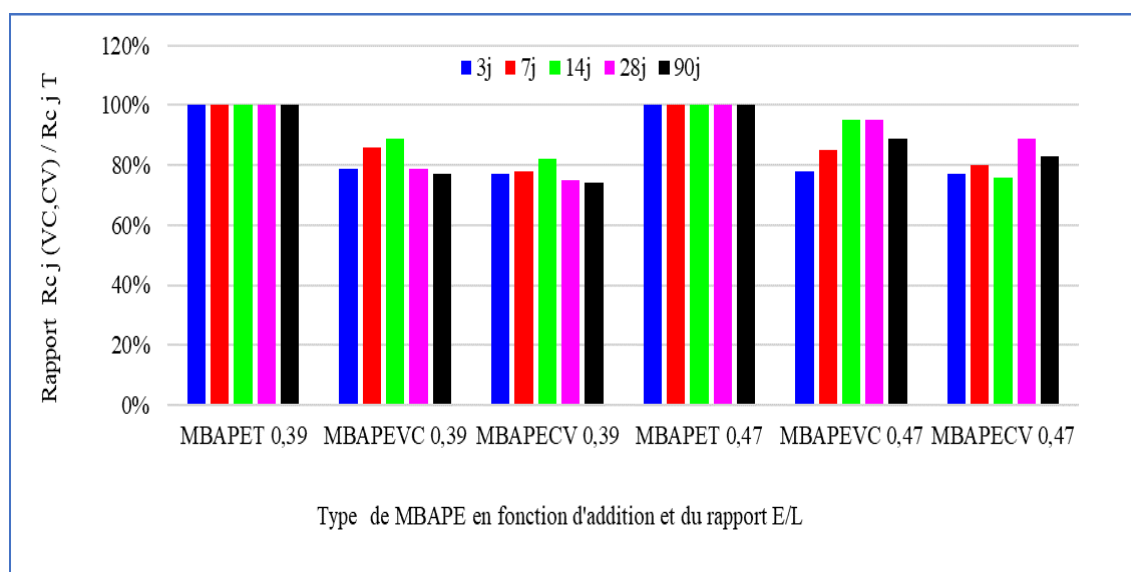


Figure II.5. Évolution de la fraction des résistances en compression des MBAPE à base des ajouts minéraux par rapport au MBAPET témoin.

Nous pouvons remarquer aussi que les différents rapports des MBAPE à base de la vase calcinée aux MBAPET donnent des résultats supérieurs à ceux contenant les cendres volantes et ce malgré que le liant équivalent utilisé pour la vase calcinée soit similaire à celui utilisé pour les cendres volantes. Cette différence, est probablement due à la finesse plus élevée de la vase calcinée par rapport à celle des cendres volantes.

II.4. INFLUENCE DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LA RÉSISTANCE À LA FLEXION

Les résistances en traction par flexion ont été déterminées pour les échéances de 3, 7, 14, 28 et 90 jours après une cure dans l'eau. Les valeurs des résistances en flexion moyennes des

différents mortiers sont données dans le tableau II.5 et représentées graphiquement sur la figure II.6.

Tableau II.5. Valeurs des résistances à la flexion des MBAPE étudiés

Désignation MBAPE	Résistance à la flexion (MPa)				
	3j	7j	14j	28j	90j
MBAPET 0,39	8,83	9,81	9,91	10,80	11.05
MBAPECV 0,39	8,07	8,49	8,72	8,76	9.92
MBAPEVC 0,39	7,45	7,48	7,65	7,68	9.81
MBAPET 0,47	8,12	8,54	8,72	9,61	9.76
MBAPECV 0,47	7,22	7,63	7,65	7,95	8.30
MBAPEVC 0,47	7,20	7,48	7,5	7,53	9.12

Les résultats montrent que globalement l'évolution de la résistance à la flexion au cours du temps est à l'inverse de celle de la résistance à la compression.

Il est connu que les facteurs influant sur l'évolution de la résistance à la compression influent également sur l'évolution de la résistance à la traction d'un mortier [15]. Neville [16] a indiqué qu'il y avait une proportionnalité directe entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression du béton. Ce qui n'est pas le cas pour nos mortiers puisque c'est les mortiers à base de vase calcinée qui donnent une valeur inférieure de la résistance à la flexion néanmoins les résistances des mortiers avec d'addition restent proches.

D'après les résultats obtenus, le mortier de référence affiche la meilleure résistance à la flexion par rapport aux mortiers contenant vase calcinée et mortier à base des cendres volantes quant au MBAPEVC il a développé de faibles résistances à la flexion par rapport au MBAPECV. D'après la figure II.6, nous constatons que son développement suit un principe inverse que la résistance à la compression pour les deux rapports $E/L=0.39$ et 0.47 .

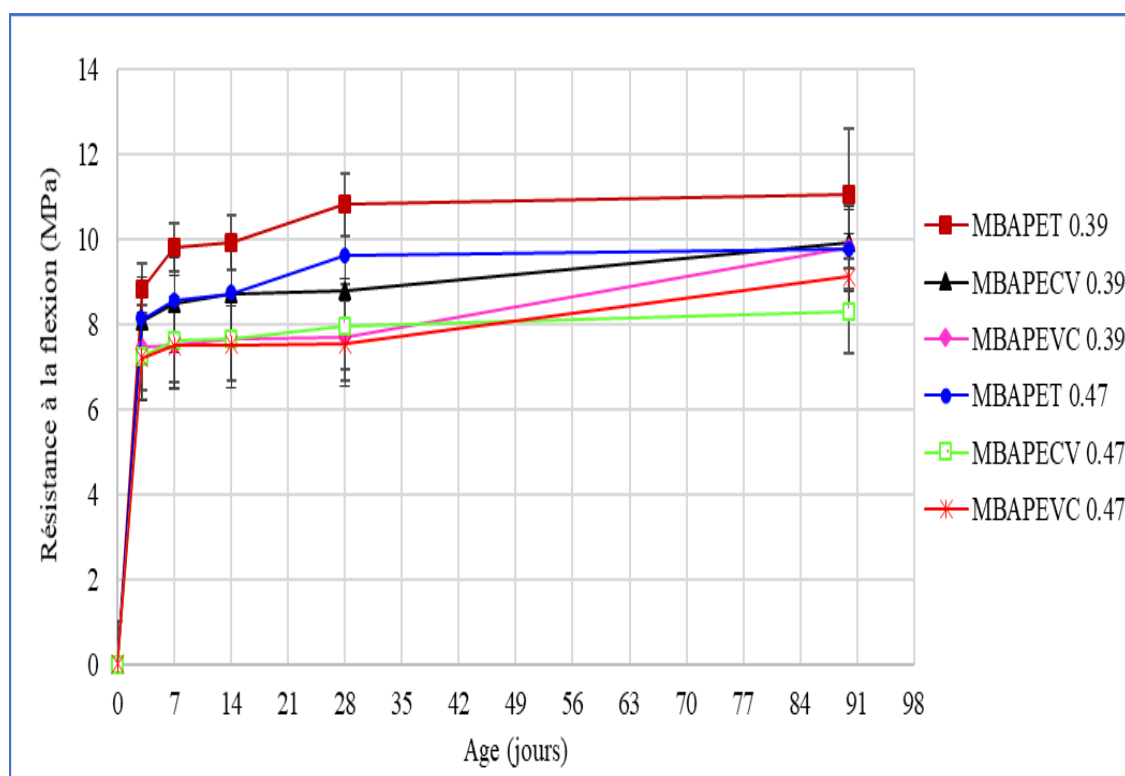


Figure II.6. Évolution des résistances à la flexion au cours du temps

Les résultats des mesures des résistances à la flexion montrent que la nature d'addition minérale influence significativement sur la résistance à la flexion. La figure II.7 montre clairement que le mortier témoin présente les meilleures performances suivies du mortier à base de vase calcinée et enfin le mortier à base des cendres volantes, cette diminution peut témoigner d'une certaine activité pouzzolanique. En effet, moins de ciment implique non seulement moins d'hydrates mais aussi moins de portlandite et par conséquent moins de réaction pouzzolanique [5].

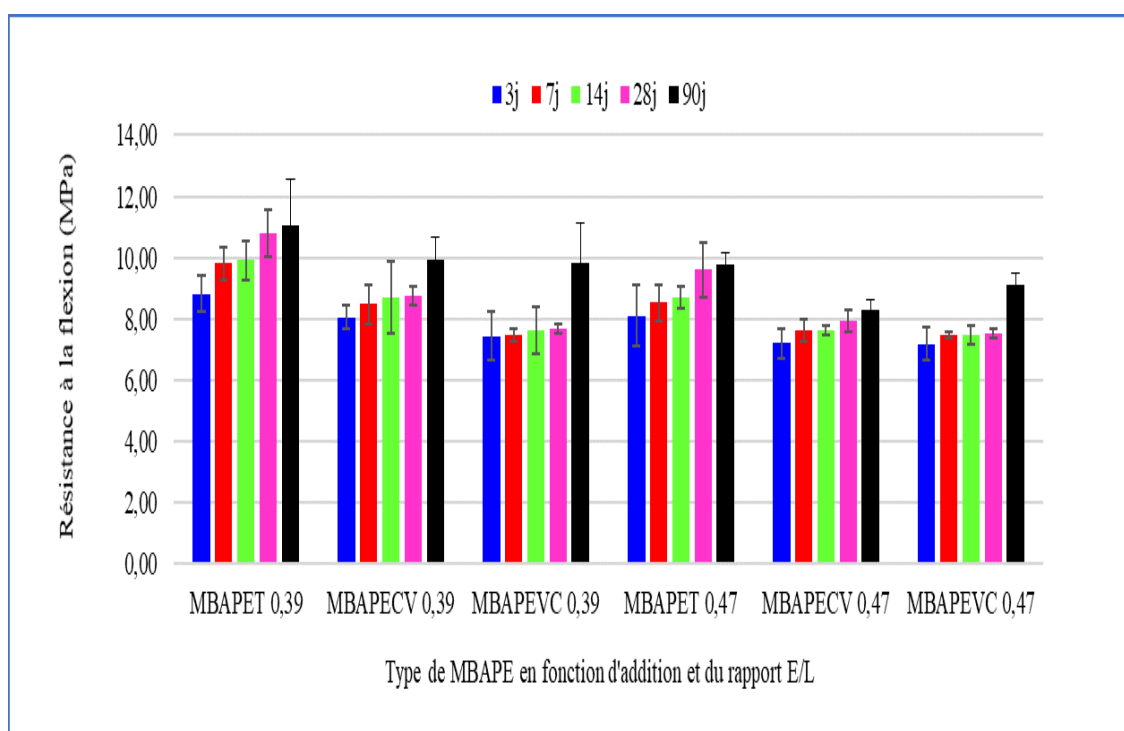


Figure II.7. Histogramme d'évolution des résistances à la flexion de la nature du liant et du rapport E/L

Concernant l'influence de E/L d'après la figure II.7, il est nettement visible que la résistance mécanique à la flexion de tous les mortiers durcis à tout âge décroît avec l'augmentation du rapport E/L.

Pour mieux analyser les cinétiques de durcissement des mortiers étudiés, nous avons choisi la notion de résistance relative (R_{fj}/R_{f28}) pour les différentes formulations.

Dans le tableau II.6 et figure II.8 nous remarquons que les deux ajouts entraînent une diminution des résistances en flexion par rapport au mortier témoin, cela peut être expliqué par le fait que l'incorporation d'addition, entraîne systématiquement une réduction des minéraux C_3S et C_2S , ces derniers sont donc les deux principaux minéraux qui assurent le développement des résistances, leur hydratation est moins intense, la quantité de portlandite libérée qui entrera en réaction avec la silice de la vase ou de la cendre volante est amoindrie et par conséquent l'intensité de la réaction pouzzolanique est faible, induisant une diminution des résistances en flexion à court terme par rapport au mortier témoin.

Tableau II.6. Cinétique de développement des résistances à la flexion

R_{fj}/R_{f28} (de même MBAPE)	MBAPET 0,39	MBAPEVC 0,39	MBAPECV 0,39	MBAPET 0,47	MBAPEVC 0,47	MBAPECV 0,47
R_{f3}/R_{f28}	0,82	0,97	0,92	0,84	0,96	0,91
R_{f7}/R_{f28}	0,91	0,97	0,97	0,89	0,99	0,96
R_{f14}/R_{f28}	0,92	0,99	0,99	0,91	0,99	0,96
R_{f28}/R_{f28}	1	1	1	1	1	1
R_{f90}/R_{f28}	1.02	1.28	1.13	1.02	1.21	1.04

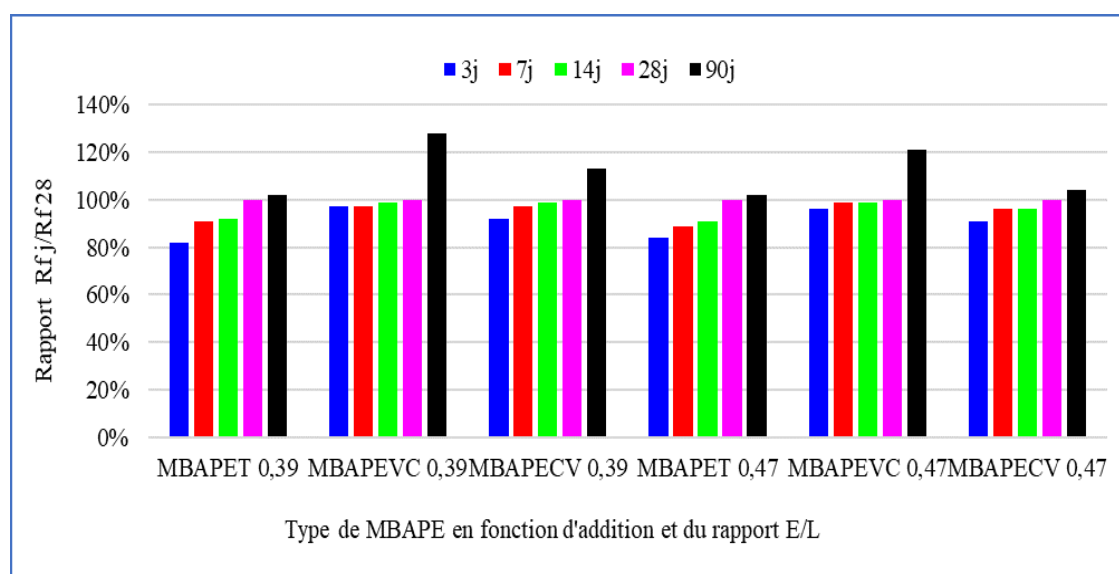


Figure II.8. Évolution de la fraction des résistances en flexion des MBAPE par rapport au MBAPE à 28 jours de même MBAPE

Les cinétiques de durcissement des MBAPEVC sont plus rapides au départ. En effet, une moyenne de 96.5% de la résistance à la flexion a été atteinte à 3 jours de conservation. À moyen terme (90 jours) les mortiers à base de vase calcinée présentent les meilleures résistances relatives que ceux contenant des cendres volantes.

À partir du tableau II.7 qui schématise un rapport entre les résistances à la flexion des MBAPE (VC, CV) j et MBAPET j, nous pouvons constater que c'est les mortiers à base des cendres volantes qui développent les meilleures performances par rapport aux mortiers contenant la vase traitée (figure II.9).

Tableau II.7. Rapport des résistances à la compression R_{fj} (MBAPE (VC, CV)) / R_{fj} (MBAPET)

Âges (jours)	R_{fj} (MBAPE (VC, CV)) / R_{fj} (MBAPET)					
	MBAPET 0,39	MBAPEVC 0,39	MBAPECV 0,39	MBAPET 0,47	MBAPEVC 0,47	MBAPECV 0,47
3	1	0,84	0,91	1	0,89	0,89
7	1	0,76	0,87	1	0,88	0,89
14	1	0,77	0,99	1	0,86	0,88
28	1	0,71	0,81	1	0,78	0,83
90	1	0,89	0,90	1	0,93	0,85

Pour mieux visualiser l'évolution de la résistance à la flexion, nous comparons les différents rapports des MBAPE à base des ajouts minéraux (vase calcinée et cendre volante) aux MBAPE témoin, schématisé sur la figure II.9. Elle augmente pour le MBAPECV0.47 comparé au MBAPEVC 0.47. À 28 jours, le MBAPECV 0.39 et MBAPEVC 0.39 présentent respectivement des résistances à la flexion 19 % et 29 % inférieurs que celle du MBAPET 0.39 respectivement, pendant que le MBAPECV 0.47 et MBAPEVC 0.47 présentent respectivement des résistances en flexion, 17% et 22% moins que celle du MBAPET 0.47.

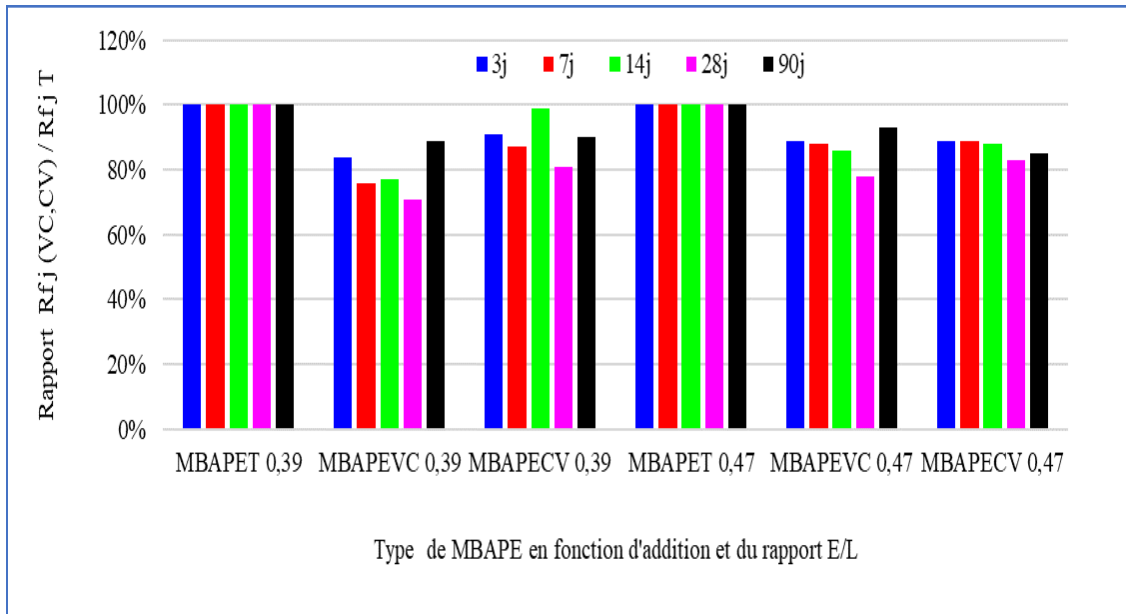


Figure II.9. Évolution de la fraction des résistances en flexion des MBAPE à base des ajouts minéraux par rapport au MBAPE témoin

II.5. CORRÉLATION ENTRE LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION ET À LA FLEXION

Nous avons essayé de proposer une corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion à partir de nos résultats expérimentaux. La figure II.10 présente cette corrélation.

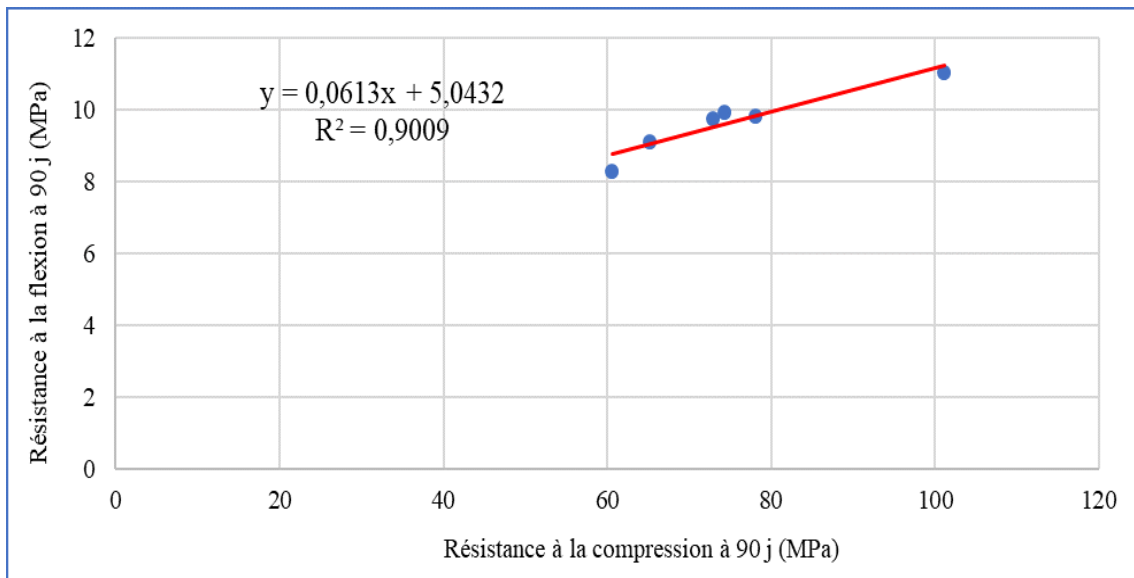


Figure II.10. Corrélation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression des MBAPE étudiés.

D'après la figure II.10, la résistance à flexion peut être liée à la résistance à la compression, il existe une corrélation entre ces deux résistances. Le coefficient de corrélation déterminé est de l'ordre de 0.90. Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par Neville [16], Niknezhad [2], Coppola et al [17] et Sadrmomtazi et al [18].

II.6. CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif de comparer les résistances mécaniques de mortier de béton autoplaçant équivalent à base de vase calcinée ou des cendres volantes avec celles du mortier témoin utilisé comme référence. Les résistances mécaniques diminuent avec l'incorporation de l'ajout dans le mortier en comparaison avec le mortier de référence. Nous pensons que l'addition minérale entraîne une diminution des résistances mécaniques par rapport un mortier témoin, cela peut être expliqué par le fait que l'incorporation d'addition, entraîne systématiquement une réduction des minéraux C_3S et C_2S , ces derniers sont donc les deux principaux minéraux qui assurent le développement des résistances à court et moyen terme, leur hydratation est moins intense, la quantité de portlandite libérée qui entrera en réaction avec la silice de l'addition est amoindrie et par conséquent l'intensité de la réaction pouzzolanique est faible, induisant une diminution des résistances en compression et en flexion à court et moyen terme par rapport au mortier témoin.

Le MBAPE avec la vase calcinée développe une résistance en compression supérieure à celle d'un MBAPE avec cendres volantes, les valeurs de résistance en compression traduisent un effet pouzzolanique de la part des sédiments traités d'un niveau supérieur à celui des cendres volantes. Le mélange à 22 % de vase calcinée à 750 °C constitue un ciment pouzzolanique, puisqu'il conduit à des résistances en compression égales à 79% et à 95% de celles obtenues avec le ciment seul, ce qui nous encourage à utiliser jusqu'à 22% de vase en remplacement du ciment, inversement pour la résistance à la traction à 28 jours d'hydratation. À 90 jours, l'augmentation de la résistance à la flexion est beaucoup plus significative dans les mortiers contenant de la vase traitée. Une résistance de 9.12 MPa à 90 jours de cure est atteinte par le MBAPEVC 0.47 au lieu de 8.3 MPa pour le MBAPECV 0.47. Ceci a été relié à la réactivité de cette vase. Il paraît ainsi possible d'obtenir de meilleures résistances à la flexion avec ce type d'addition et ceci à long terme.

Enfin, on peut dire que l'objectif de fabriquer des mortiers autoplaçants à base de vase traitée par calcination de résistance acceptable et préconisée pour chaque rapport E/L (0.39 et 0.47) a

été atteint en obtenant des résistances mécaniques (compression et flexion) relativement proches. Ceci confirme les données relatives au liant équivalent et permet de bien étudier l'effet de la nature de l'addition sur les caractéristiques de retrait des différentes formulations.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **KHATIB J.M., HIBBERT J.J.**, «Selected engineering properties of concrete incorporating slag and Metakaolin». *Construction and Building Materials* 19, 460-472(2005).
- [2] **NIKNEZHAD D.**, « Contribution à l'étude du comportement mécanique, du retrait et des propriétés de transport des bétons autoplacants avec additions minérales, approche numérique et expérimentale ». Thèse de doctorat, INSA de Rennes, France, 2015.
- [3] **BELAS N., BESSEGHIER N., MEBROUKI A., BOUHAMOU N.**, « Vers une protection de l'environnement en valorisant la vase draguée du barrage comme composant du béton ». *Mater. Tech.* 97 (2009) 231–240.
- [4] **BOUKHLIF Z.**, « Propriétés mécaniques des bétons autoplacants à base des sédiments dragués ». Mémoire de Magister, Université des sciences et de technologie, Mostaganem, 23 Février, 2012.
- [5] **SCRIVENER K.L., LOTHENBACH B., DE BELIE N., GRUYAERT E., SKIBSTED J., SNELLINGS R., VOLLPRACHT A.**, TC 238-SCM: «Hydration and microstructure of concrete with SCMs – State of the art on methods to determine degree of reaction of SCMs». *Mater. Struct.* 48(4) (2015) 835-862. Doi: 10.1617/s11527-015-0527-4
- [6] **SABIR B.B., WILD S., et BAI J.**, «Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete». *Cement and Concrete Composites*, 23(6): 441–454. Doi: 10.1016/S0958-9465(00)00092-5. 2001.
- [7] **CYR M., LAWRENCE PH., RINGOT E.**, «Mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration». *Cement Concrete Res.* 35(4) (2005) 719–730. Doi: 10.1016/j.Cemconres.2004.05.030.
- [8] **CYR M., LAWRENCE PH., RINGOT E.**, «Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength». *Cement Concrete Res.* 36(2) (2006) 264 – 277. Doi : 10.1016/j.Cemconres.2005.07.001.
- [9] **BOUHAMOU N., BELAS N., MESBAH H., JAUBERTHIE R., OUALI A., MEBROUKI A.**, « Influence des rapports eau/ciment et fines /ciment sur le comportement à l'état durci du béton autoplacant à base de matériaux locaux algériens ». *Rev. Can. Génie civ.* 36 : 1195-1206, 2009.

- [10] SEMCHA A., « Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug ». Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2006.
- [11] SEMCHA A., MEKERTA B., MAAROUF H., ABBOU M., «Utilisation des propriétés pouzzolaniques des sédiments de barrage pour leur valorisation». 12SM, Montréal, 2016.
- [12] OUHBA K., BENAMARA L., HADJ-HAMOUI A., HAMWI A., LOYE PILOT M. D., «Conception of a synthesis pozzolan from sediment dams calcined (Case: Gargar dams) ». MATEC Web of Conferences 11, 01023, 2014.
- [13] BIGAS J.P., « La diffusion des ions chlore dans les mortiers ». Thèse de doctorat, génie civil, INSA de Toulouse, 1994.
- [14] RICHEL C., AYACHE R., « Solubilité, diffusion et sorption des émetteurs α et $\beta\gamma$ dans les liants hydrauliques ». NT SESD-CEA, 1996.
- [15] BOUHAMOU N., MOSTEFA F., MEBROUKI A., BELARIBI N., MESBAH A.H., « Étude du comportement d'un béton autoplaçant à base de vase de dragage vis-à-vis du retrait ». Colloque 01 Eco matériaux. 24-28 Novembre, (2014).
- [16] NEVILLE A.M., «Properties of concrete». 4th Ed, Addison Wesley Longman, London 1996.
- [17] COPPOLA B., COURARD L., MICHEL F., INCARNATO L., DI MAIO L., «Investigation on the use of foamed plastic waste as natural aggregates replacement in lightweight mortar». Composites Part B: Engineering 2016, 99:75-83.
- [18] SADRMOHTAZI A.S., MILEHSARA D., OMRAN O.L., NIK A.S., «The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete». J. Clean. Prod 2016. 112: 2363-2373.

CHAPITRE III.

RÉSULTATS ET ANALYSE DES PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT

CHAPITRE III. RÉSULTATS ET ANALYSE DES PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT

III.1. INTRODUCTION

Après avoir examiné les propriétés mécaniques des mortiers d'étude, nous présentons dans ce chapitre les résultats de l'étude de la porosité accessible à l'eau et de l'absorption capillaire des différents MBAPE.

En effet, la connaissance de la porosité du mortier s'avère utile pour pouvoir juger les différences relatives de la porosité des formulations de MBAPE qui sont susceptibles d'expliquer les autres caractéristiques de retrait. Une méthode d'investigation de la porosité a été adoptée. Il s'agit de la porosité accessible à l'eau à l'âge de 28 jours de cure sèche des différents mortiers.

Le terme sorptivité est utilisé pour décrire le mouvement de l'eau dû à l'action des capillaires.

La mesure de la sorptivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux. Plus l'absorption capillaire est élevée, plus le matériau est susceptible à être rapidement envahi par le liquide en contact. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité.

Dans ce chapitre, la porosité ouverte et l'absorption capillaire des différentes formules de MBAPET, de MBAPEVC et de MBAPECV avec les deux rapports E/L (0.39 et 0.47) ont été caractérisées.

III.2. EFFET DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LA POROSITÉ ACCÉSSIBLE À L'EAU DES MBAPE

Pour chaque type de mortier de béton autoplaçant équivalent, nous avons travaillé sur 3 échantillons (4x4x16 cm³), les valeurs moyennes de la porosité accessible à l'eau mesurées après 28 jours de cure, sont présentées sur la figure III.1.

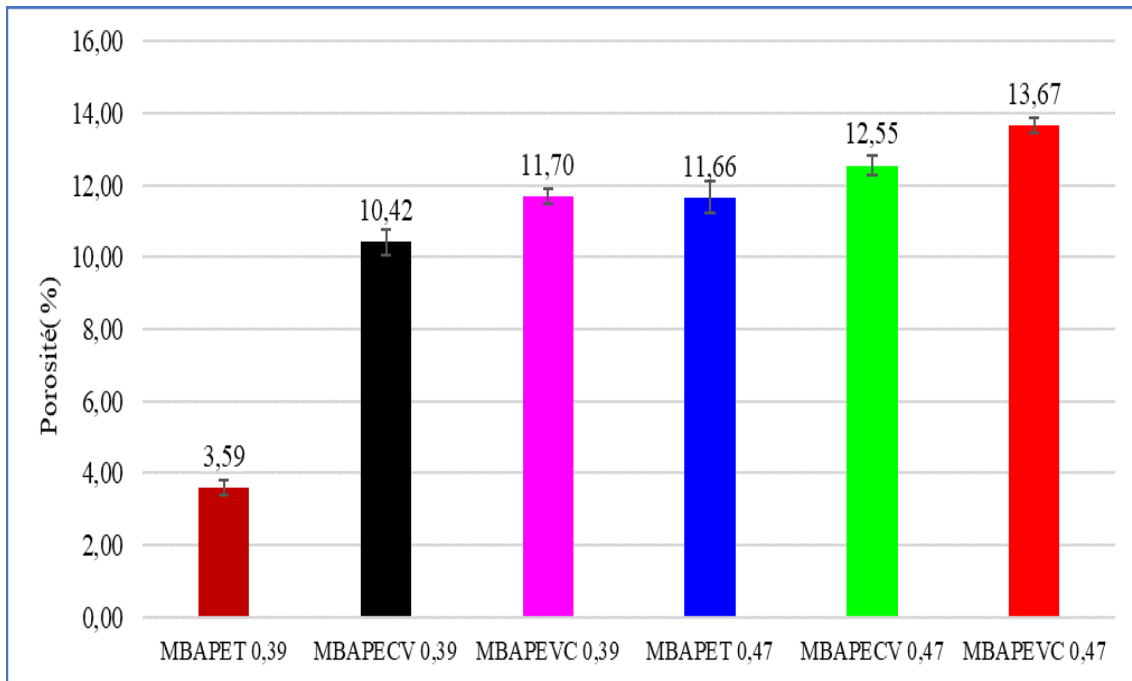


Figure III.1. Porosité accessible à l'eau des différents mortiers d'étude, essai réalisé après 28 jours de cure

La porosité d'un matériau cimentaire est un paramètre de premier ordre dans la durabilité du béton. La porosité varie selon différents facteurs comme : le rapport E/C, la compacité du mortier à l'état frais, le volume pâte/granulats, la porosité des granulats, la présence de superplastifiant [1], et également la porosité peut être affectée par l'inclusion d'une addition minérale [2].

Sur la figure III.1 on peut constater pour le rapport E/L = 0.39, que le MBAPET0.39 montre la plus faible porosité accessible à l'eau, alors que pour les mortiers contenant les deux substituants au ciment (la vase calcinée ou les cendres volantes) tend à accroître cette porosité. En effet la porosité accessible à l'eau des mortiers augmente avec les ajouts minéraux comme substitut partiel au ciment [3]. On note que la porosité accessible à l'eau est relativement équivalente (voisine) en termes d'amplitude entre les deux mortiers MBAPEVC0.39 et MBAPECV0.39. Elle varie de 10.42% à 11.70%, ceci indique que l'incorporation des ajouts augmente considérablement la porosité totale du mortier. Ce phénomène est dû à la morphologie des grains de vase et des cendres volantes et à la faible densité des CSH résultant de la réaction pouzzolanique comparée à celle des CSH issus de l'hydratation du ciment [4]. Ces résultats sont en accord avec les mesures de la teneur en eau libre (comme décrit précédemment dans ce mémoire à la partie III, chapitre I).

La figure III.2 montre bien qu'il existe une corrélation entre la teneur en eau libre après 28 jours de cure et la porosité ouverte. Le coefficient de corrélation déterminé est de l'ordre de 0.89.

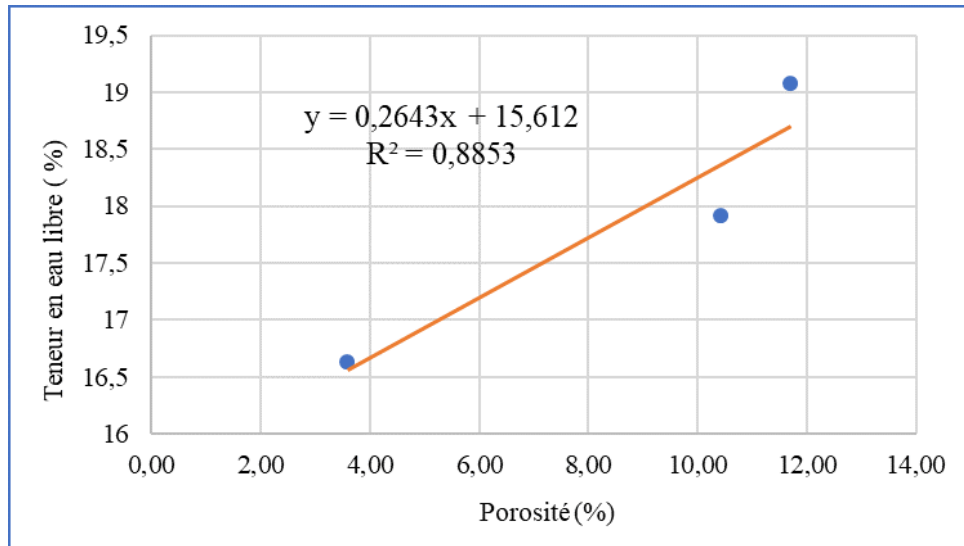


Figure III.2. Variation de la teneur en eau libre en fonction de la porosité ouverte avec $E/L=0.39$

En ce qui concerne le rapport $E/L= 0.47$, les résultats de porosité obtenue pour les trois MBAPE étudiés montrent que le remplacement du ciment par la cendre volante présente les plus faibles valeurs de porosité en comparaison avec la vase calcinée et entraîne une augmentation de la porosité accessible à l'eau du MBAPECV de 8% par rapport à celle du MBAPET. L'utilisation de la vase calcinée comme substitut partiel au ciment portland entraîne une augmentation de la porosité à l'eau de 17.2 % à 28 jours par rapport à celle du MBAPET 0.47. Ces résultats sont en accord avec les mesures de la teneur en eau libre (voir partie III, chapitre I). La teneur en eau libre mesurée permet une estimation de la porosité des mortiers étudiés. Cette eau libre occupe en effet une partie du réseau poreux [5], de sorte que la quantité d'eau libre dans chaque mortier dépend de la structure poreuse de ce mortier.

D'après la figure III.3, il existe une corrélation entre la teneur en eau libre et la porosité ouverte avec un coefficient de corrélation de 0.99.

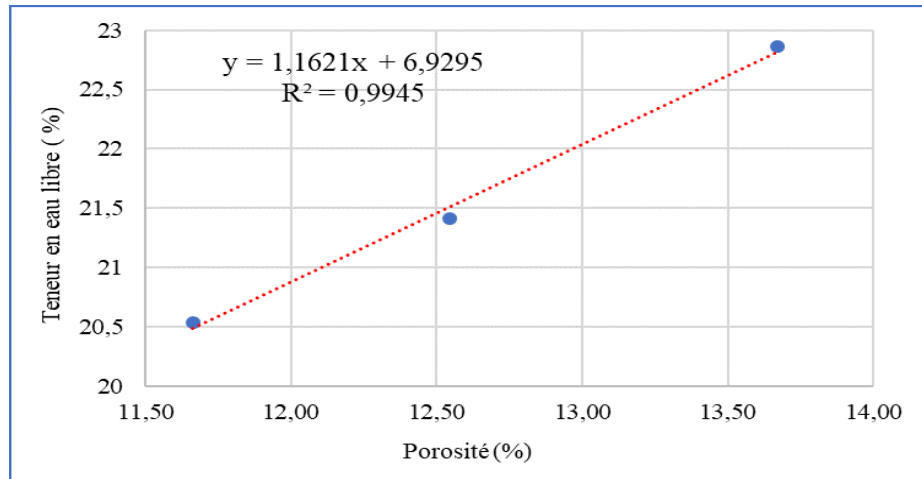


Figure III.3. Variation de la teneur en eau libre en fonction de la porosité ouverte avec $E/L=0.47$

La comparaison entre les résultats des différents MBAPE étudiés permet de conclure que la porosité accessible à l'eau augmente avec l'utilisation d'additions minérales comme substitut partiel au ciment à court terme [3]. Cette augmentation de la porosité lors de l'introduction de la vase calcinée et des cendres volantes peut être due à la moindre pouzzolanité et à l'hydraulicité de ces ajouts à court terme (28 jours). En revanche, la pouzzolanité ou l'hydraulicité des cendres volantes peuvent réduire la porosité à long terme si le mortier est conservé humide [6].

À partir des résultats des formulations de MBAPE et selon chaque rapport E/L, on peut constater que la porosité accessible à l'eau des mortiers de référence et des mortiers à base des cendres volantes est légèrement plus faible que celle des mortiers contenant la vase calcinée.

Les formulations du MBAPEVC et du MBAPECV montrent des résultats distincts. Après 28 jours de cure, les formulations de MBAPECV présentent des porosités légèrement inférieures par rapport à celles des MBAPEVC, la différence est de 12.28 % et 8.92% respectivement pour les rapports E/L de 0.39 et 0.47.

On note par ailleurs pour les formulations du MBAPET des porosités inférieures par rapport à celles des MBAPEVC et des MBAPECV de même rapport E/L. Concernant l'influence de E/L d'après la figure III.1, il est nettement visible que la porosité ouverte de tous les mortiers durcis à 28 jours de conservation croît avec l'augmentation du rapport E/L.

La porosité accessible à l'eau est un paramètre étroitement lié à la durabilité du matériau qui permet de quantifier le volume relatif des vides mais non sa connectivité [3]. Selon Assié [7], la première caractéristique qu'il convient de représenter en fonction de la résistance mécanique est la porosité accessible à l'eau. Ce paramètre est donc directement lié à la résistance mécanique du béton ou mortier [8].

En effet, dans notre étude, les différences de comportement en fonction de la nature de l'addition minérale dans les formulations du MBAPE concordent bien avec les résultats des résistances mécaniques. Des relations linéaires entre la porosité et les résistances mécaniques sont trouvées avec des valeurs du coefficient de la corrélation de $R^2 = 0.86$ pour la résistance à la compression et $R^2 = 0.75$ pour la résistance à la flexion (figure III.4 et figure III.5).

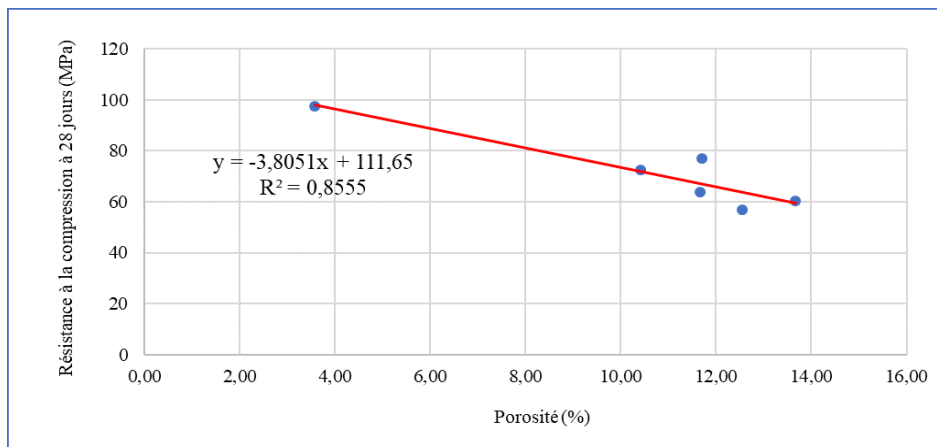


Figure III.4. Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité ouverte avec les deux rapports E/L

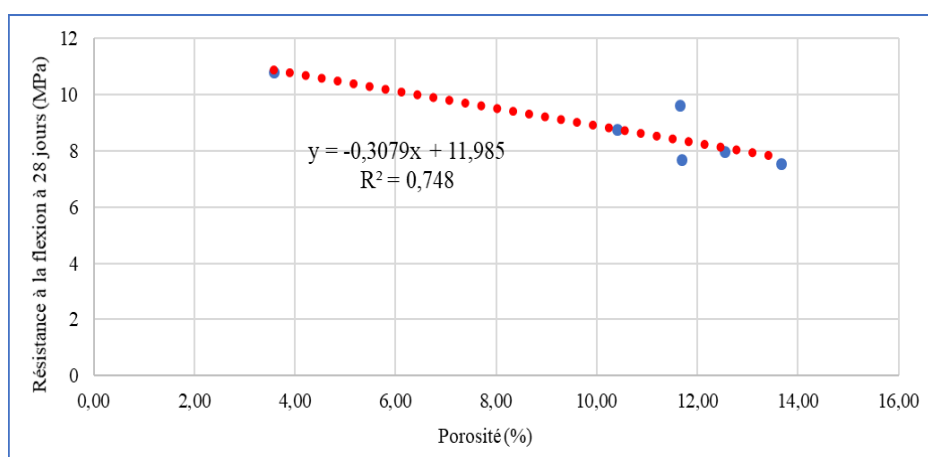


Figure III.5. Variation de la résistance à la flexion en fonction de la porosité ouverte avec les deux rapports E/L

III.3. EFFET DES ADDITIONS MINÉRALES SUR L'ABSORPTION CAPILLAIRE (LA SORPTIVITÉ) DES MBAPE

Les coefficients de sorptivité (S) après 0.25h, 0.3h, 1h, 2h, 4h, 8h et 24h d'essai, sont présentés pour les six formulations de mortiers après 28 jours de conservation sur la figure III.6.

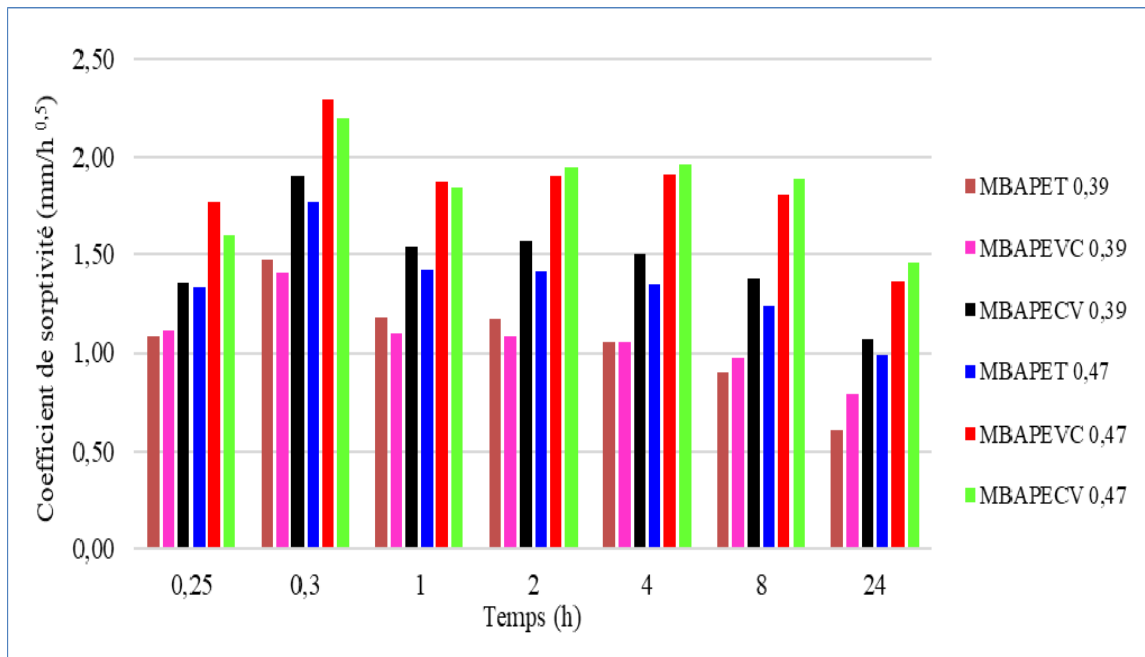


Figure III.6. Coefficients de sorptivité des différents mortiers d'étude, essai réalisé après 28 jours de conservation

Nous constatons tout d'abord que le coefficient de sorptivité augmente avec l'augmentation du rapport E/L.

À partir de la figure III.6, la comparaison entre les différentes formulations du MBAPE de même rapport E/L montre des faibles coefficients de sorptivité des formulations du MBAPET et du MBAPEVC par rapport à ceux des MBAPECV. En effet, les résultats des essais réalisés sur les MBAPE aux rapports E/L= 0.39 et 0.47 confirment que l'incorporation de la vase calcinée a un effet bénéfique sur la réduction de l'absorption capillaire des mortiers en comparaison avec les cendres volantes. Le coefficient de sorptivité des formulations du MBAPEVC est systématiquement inférieur par rapport à celui des formulations du MBAPECV.

Étant donné que les pores capillaires se remplissent d'eau progressivement avec le temps durant l'essai, le coefficient d'absorption capillaire diminue au cours du temps. Par conséquent, nous constatons d'après les résultats correspondant aux différentes heures d'essai une diminution de la valeur des coefficients de sorptivité à partir de 0.3 h. La grande diminution est remarquée pour la formulation du MBAPET 0.39. Les coefficients de sorptivité (S) à l'échéance 24 heures, sont présentés sur la figure III.7. Par comparaison entre les résultats correspondant aux différentes heures d'essai, nous pouvons constater la diminution de la valeur des coefficients de sorptivité à partir de 0.3 h. La grande diminution est remarquée pour la formulation du MBAPET 0.39.

Les coefficients de sorptivité (S) à l'échéance 24h, sont présentés sur la figure III.7.

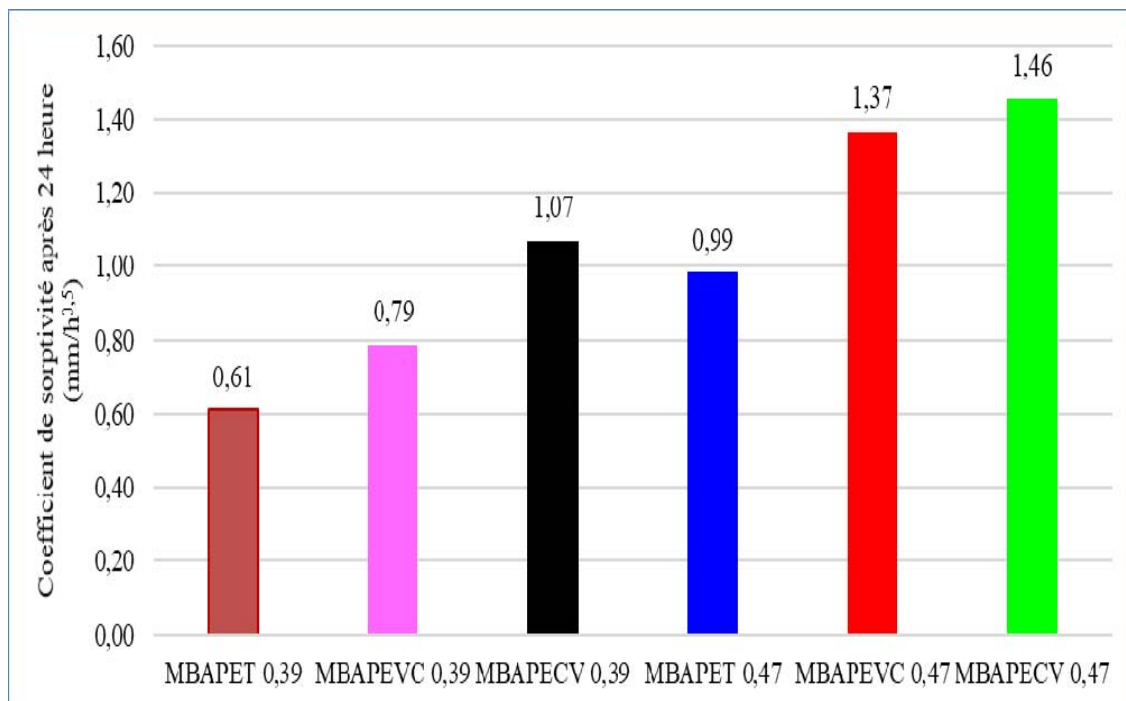


Figure III.7. Coefficients de sorptivité des différents mortiers à l'échéance 24 heures

D'après la figure III.7, la grande différence pour cet essai réalisé après 24 heures est notée pour le rapport E/L= 0.39, dont le MBAPECV 0.39 présente un écart de 43% et 26% avec, respectivement, le MBAPET 0.39 et le MBAPEVC 0.39. Pour le rapport E/L=0.47 la différence est comprise entre 32 et 6%.

En comparant les résultats entre les différentes formulations du MBAPE de même rapport E/L, nous pouvons conclure qu'en général les MBAPE avec les deux différents types

d'additions minérales (vase et cendres) présentent une absorption capillaire (représenté par le coefficient de sorptivité) élevée que les MBAPE de référence.

Néanmoins, la présence de la vase calcinée dans les MBAPE réduit sensiblement son absorptivité par rapport aux cendres volantes. Aussi la vase calcinée réduit les pores capillaires par le remplissage de ces pores par le gel C-S-H de seconde génération formé à partir de la silice de la vase et la portlandite, l'hydrate résultant de l'hydratation du ciment [9].

La différence remarquée entre les formulations du MBAPEVC et du MBAPCV est peut-être liée aussi à la différence du développement de la résistance à la compression plus prononcée pour les MBAPVC que les MBAPEVC. D'une façon générale, l'absorptivité en présence de la vase calcinée peut être réduite, à court terme, à cause du développement de la réaction pouzzolanique, ce qui est en accord aussi avec l'augmentation de la résistance à la compression en comparaison avec les cendres volantes. Des relations linéaires entre la sorptivité et la résistance à la compression sont trouvées. La sorptivité diminue avec l'augmentation de la résistance à la compression (figure III.8).

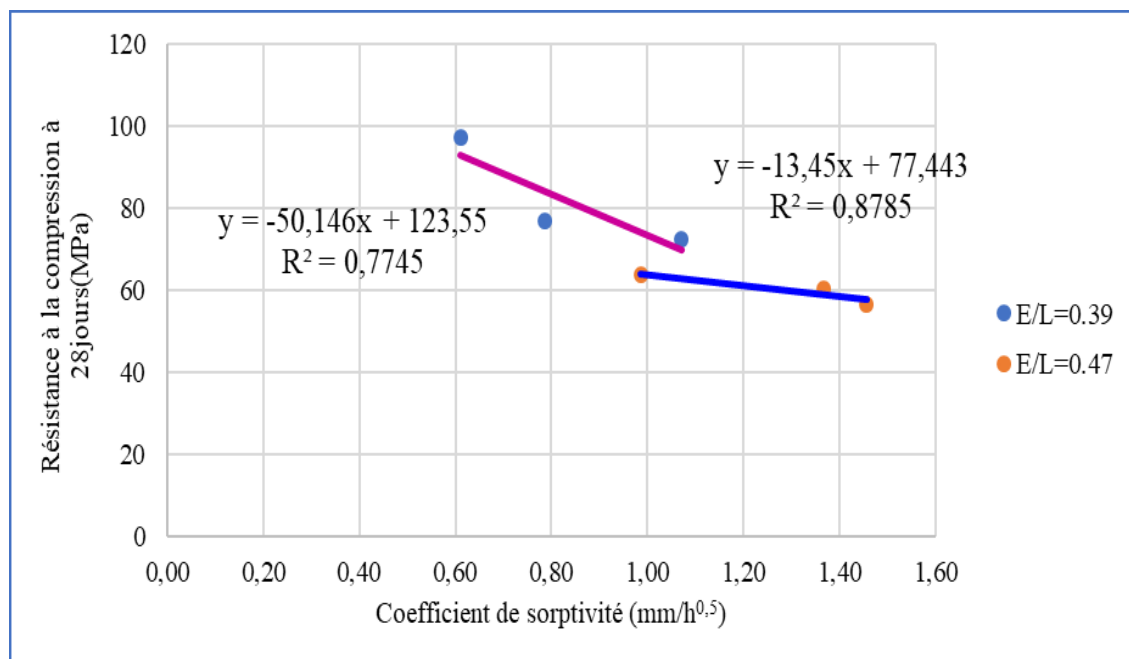


Figure III.8. La variation de la résistance à la compression en fonction de coefficient de sorptivité à l'échéance 24 h

Siad. H [3] et Kianoosh. S [10] ont également trouvé une concordance entre le développement de la résistance mécanique et la diminution de l'absorption capillaire. Selon ces auteurs, un

mûrissement plus long favorise la formation d'une plus grande quantité d'hydrates qui viennent combler et fractionner davantage la porosité capillaire.

Enfin, nous pouvons conclure que l'incorporation de la vase calcinée a un effet bénéfique sur la dimension des capillaires du mortier durci, puisque l'absorption capillaire renseigne sur la montée de l'eau à travers la porosité ouverte du mortier produite par la tension superficielle du liquide. La réduction de l'absorption capillaire pour les mortiers contenant de la vase calcinée en comparaison avec les mortiers contenant des cendres volantes peut s'expliquer par le développement de la réaction pouzzolanique de la vase calcinée à court terme.

III.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, l'influence du type de liant sur la porosité accessible à l'eau et sur l'absorption capillaire a été montrée.

Les résultats des mesures ont montré que les MBAPE avec additions présentent un coefficient d'adsorption élevé que les MBAPE de référence pour chaque rapport E/L. En revanche la présence de la vase calcinée dans les MBAPE réduit sensiblement son absorptivité par rapport aux mortiers aux cendres volantes, contrairement au résultat obtenu pour la porosité accessible à l'eau. Le MBAPE de référence pour chaque rapport E/L (0.39 et 0.47) présente les plus faibles valeurs de porosité et d'adsorption capillaire, résultat qui corrobore bien les analyses DRX, analyses ATG et observations au MEB-EDS.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CHEN W., « Étude expérimentale de la perméabilité du béton sous conditions thermiques et hydriques variables ». Thèse de doctorat, école centrale de Lille, 2013.
- [2] DEBOUCHA W., LEKLOU N., KHELIDJ A., PERTUE A., OUDJIT M.N., « L'effet du laitier de haut fourneau sur la porosité du mortier », 35èmes rencontres de l'AUGC, ECN/UN, Nantes, 22 au 24 Mai 2017.
- [3] SIAD H., « Influence du type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants ». Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 2010.
- [4] 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.
- [5] Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, caractéristiques de microstructures et propriétés relatives à la durabilité des bétons, méthodes d'essai n° 58, Février 2002.
- [6] OLLIVIER J., TORRENTI J., «The porous structure of concrete and transfer properties». Chapter.<https://www.researchgate.net/publication/290158099>. (2008).
- [7] ASSIE S., « Durabilité des bétons autoplaçants ». Thèse de doctorat, INSA Toulouse, 2004.
- [8] BESSA A., BIGAS J.P., GALLIAS J-L., « Évaluation de la contribution liante des additions minérales a la porosité, a la résistance en compression et a la durabilité des mortiers ». XXIIIèmes rencontres universitaires de génie civil - VILLE & GENIE CIVIL. 3-4 Juin 2004. L'université Marne-la-Vallée (France).
- [9] GHRICI M., KENAI S., SAID-MANSOUR M., «Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements». Cement & Concrete Composites 29 (2007) 542–549.
- [10] KIANOOSH S., « Contribution à l'étude de la durabilité des BAP dans les milieux agressifs : effets des pouzzolanes naturelles », thèse de doctorat, INSA de Rennes ,2016

CHAPITRE IV.

RÉSULTATS ET ANALYSE DU COMPORTEMENT DIFFÉRÉ LIBRE ET LA FISSURATION

CHAPITRE IV. RÉSULTATS ET ANALYSE DU COMPORTEMENT DIFFÉRÉ LIBRE ET LA FISSURATION

IV.1. INTRODUCTION

Comme il a été énoncé dans la partie I chapitre II, nous nous intéressons aux mesures du retrait plastique, retrait total et du retrait endogène. Nous ferons ensuite la distinction entre le retrait endogène et le retrait de dessiccation et nous cherchons la relation entre le retrait de dessiccation et la perte de la masse. Il est admis que le retrait total correspond à la somme des retraits individuels qui sont : le retrait thermique (négligeable), le retrait endogène, le retrait de dessiccation et le retrait de carbonatation (s'il existe). À la fin nous montrons les résultats de la fissuration due au retrait empêché.

IV.2. RETRAIT AU TRÈS JEUNE ÂGE-RETRAIT PLASTIQUE LIBRE DANS DES CONDITIONS DE SÉCHAGE

La figure IV.1 présente l'évolution du retrait plastique des MBAPE avec le rapport $E/L=0.39$ en condition de séchage (20 ± 1 °C et $50\pm 2\%$ d'humidité relative). Les résultats montrent que les MBAPE avec additions (vase calcinée et cendres volantes) développent un retrait plastique plus important que le MBAPE de référence en conditions de dessiccation. Directement après le début de la mesure (environ 80 min après le contact eau-ciment), la déformation du MBAPET 0.39 commence à augmenter d'une façon linéaire jusqu'à 2 h. Après, la cinétique d'évolution de la déformation diminue pour atteindre ensuite un plateau de stabilisation.

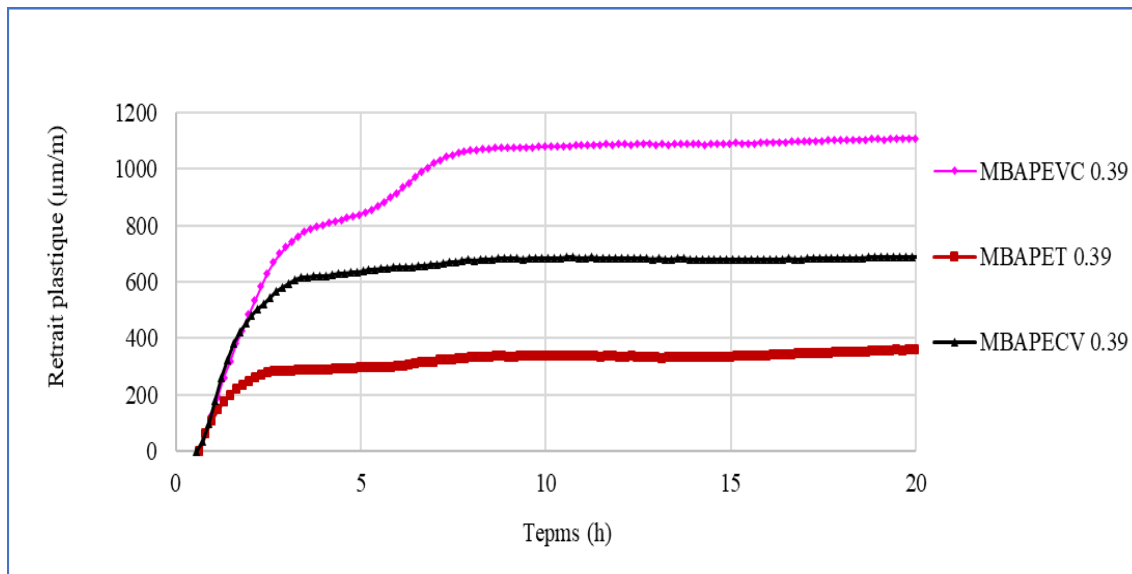


Figure IV.1. Mesure de retrait plastique des MBAPE avec le rapport E/L=0.39 en conditions de dessiccation

D'après la figure IV.1, le retrait plastique a commencé à croître au cours de la première heure, puis a évolué de manière linéaire jusqu'à 2h, 3h et 7h pour MBAPET 0.39, MBAPEVCV 0.39 et MBAPEVC 0.39 respectivement. La déformation pour le MBAPEVC 0.39, a progressivement évolué jusqu'à 7h atteignant une valeur de retrait plastique de 1030.8 µm/m. À la fin de l'essai, la valeur finale de MBAPEVC 0.39 est plus élevée que celles des MBAPE de référence et des cendres volantes en conditions de dessiccation.

La figure IV.2 présente l'évolution du retrait plastique du MBAPET 0.47, MBAPEVC 0.47 et MBAPEVCV 0.47 en condition de séchage (20 ± 1 °C et $50 \pm 2\%$ d'humidité relative). Les résultats montrent que le MBAPE avec cendres volantes développe un retrait plastique plus faible que le MBAPE de référence et le MBAPE à base de vase calcinée en conditions de dessiccation. Directement après le début de la mesure (environ 120 min après le contact eau-ciment), la déformation du MBAPEVCV 0.47 commence à augmenter d'une façon linéaire jusqu'à 5 h. Après, la cinétique d'évolution de la déformation diminue pour atteindre ensuite un plateau de stabilisation. Les résultats relatifs à l'initiation et développement de fissures par l'essai de retrait empêché (comme décrit dans ce chapitre à la section IV.4) ont montré qu'il existait une corrélation indirecte entre le retrait plastique et l'âge de la fissuration.

En effet, la diminution du retrait plastique conduit à une augmentation de l'âge de la fissuration, diminuant ainsi le risque de fissuration.

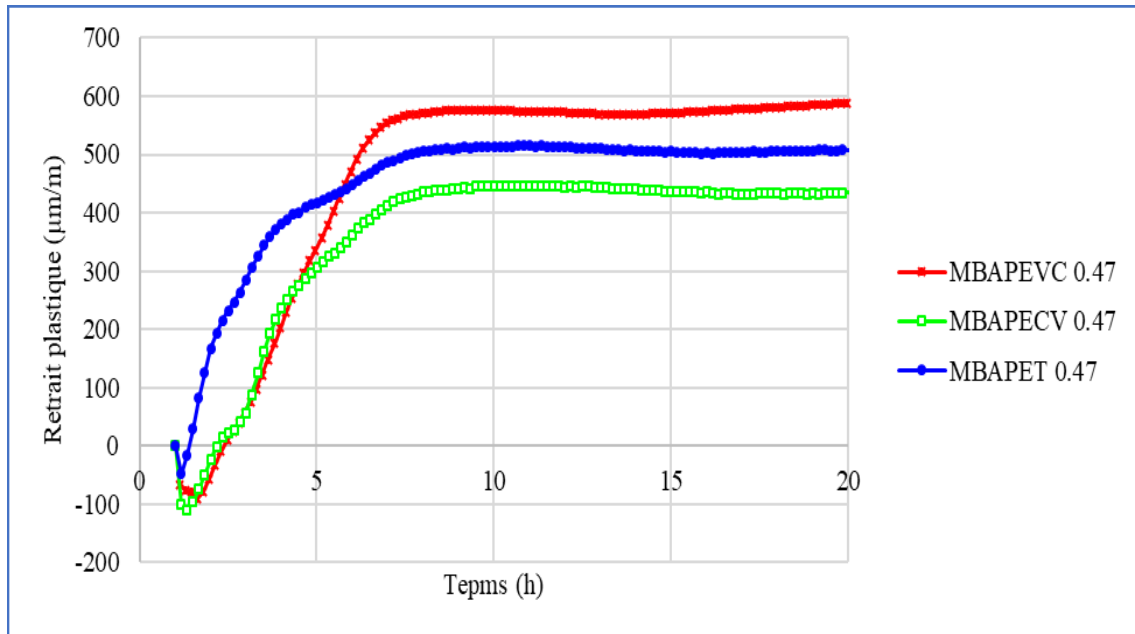


Figure IV.2. Mesure de retrait plastique des MBAPE avec le rapport $E/L=0.47$ en conditions de dessiccation

La figure IV.3, présente le développement de retrait plastique de nos différents mélanges de MBAPE avec les deux rapports $E/L= 0.39$ et 0.47 . Ce développement peut être attribué à plusieurs phénomènes qui se produisent à l'état frais du matériau.

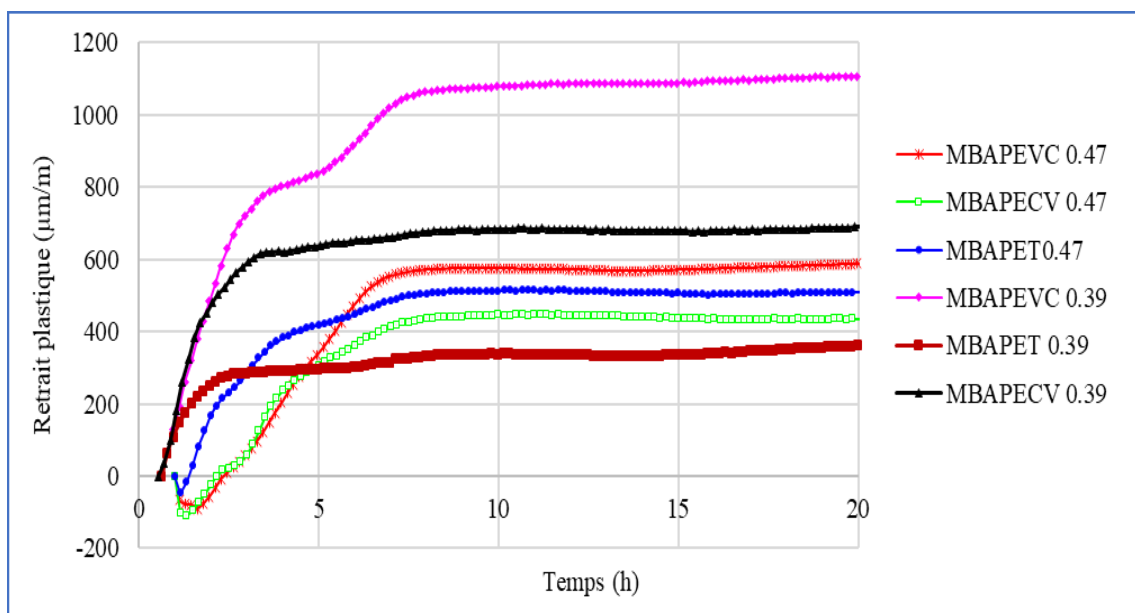
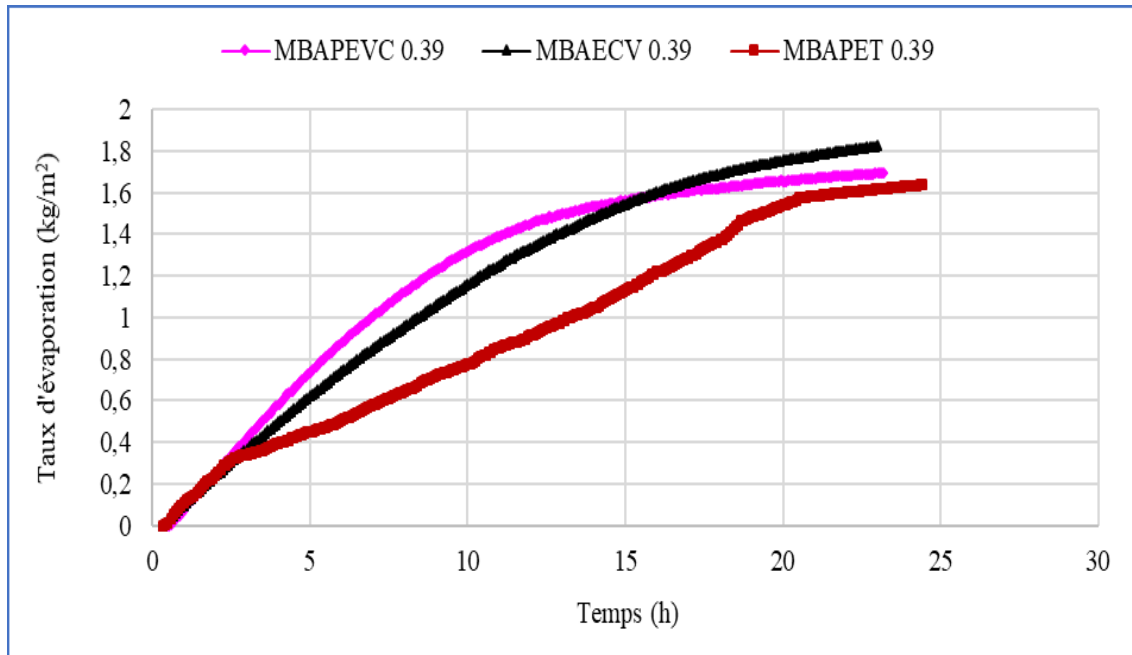


Figure IV.3. Mesure de retrait plastique des MBAPE étudiés en conditions de dessiccation avec les deux rapports E/L

D'abord, lorsque le MBAPE est mis en place dans le moule et sous l'effet de la gravité, le phénomène de consolidation se développe entraînant avec lui une remontée de l'eau à la surface du mortier, ce qui peut générer un ressuage plus ou moins important. En même temps, un deuxième phénomène a lieu, il s'agit du retrait chimique dû à l'hydratation des phases anhydres du MBAPE (ciment + additions). Dans des conditions de dessiccation, il correspond d'abord à l'évaporation du film d'eau à la surface et ensuite à l'évaporation de l'eau dans le matériau frais et ensuite durci. À partir des résultats obtenus, on peut constater que le retrait plastique de MBAPET 0.39 est plus faible que ce des autres MBAPE d'étude. Concernant l'influence de E/L d'après la figure IV.3, il est nettement visible que le retrait plastique des mortiers frais décroît avec l'augmentation du rapport E/L, sauf pour le MBAPET 0.39.

Le développement de retrait plastique de nos différents mélanges de MBAPE peut être attribué au phénomène d'évaporation qui se produit à l'état frais du matériau. La figure IV.4 présente l'évolution du taux d'évaporation des MBAPE avec le rapport E/L=0.39. D'après cette figure, le MBAPET présente un taux d'évaporation moins important que MBAPEVC et MBAPECV. La prise plus rapide du MBAPE de référence rend plus difficile l'évaporation de l'eau ce qui lui permet de développer un retrait plus faible que celui des autres MBAPE avec additions. Les MBAPE à base de vase calcinée et des cendres volantes présentent un taux d'évaporation plus important contrairement au MBAPE à base de ciment Portland, à cause de leur teneur en eau libre plus importante due à une prise plus tardive et plus lente ainsi qu'un taux d'hydratation plus faible. Ce résultat est en accord avec les résultats des mesures de l'eau libre. Même si ces mesures ont été faites à 28 jours de maturation, elles montrent toutefois un plus faible taux d'hydratation des MBAPE avec additions.



FigureIV.4. Mesure de taux d'évaporation des MBAPE avec $E/L = 0.39$.

La figure IV.5 présente l'évolution du taux d'évaporation des MBAPE avec le rapport $E/L=0.47$.

D'après cette figure, le MBAPECV présente un taux d'évaporation plus important que MBAPEVC et MBAPET, contrairement aux résultats obtenus par le retrait plastique. Cela peut être expliqué par sa plus faible teneur en eau liée en comparaison avec les deux autres mortiers. En revanche, le mortier contenant de la vase calcinée développe le moindre taux d'évaporation. En effet, un test de consistance normale a été effectué avec l'appareil Vicat, sur une pâte contenant 100% de vase calcinée, présentait une consistance normale avec un rapport eau / vase de 0,45, tandis qu'une pâte contenant 100% de ciment présentait une consistance normale avec un rapport E / C égal à 0,26 [1], en plus de la grande finesse de cette vase qui explique sa forte demande en eau et donc un faible taux d'évaporation entraînant un fort processus d'hydratation au jeune âge.

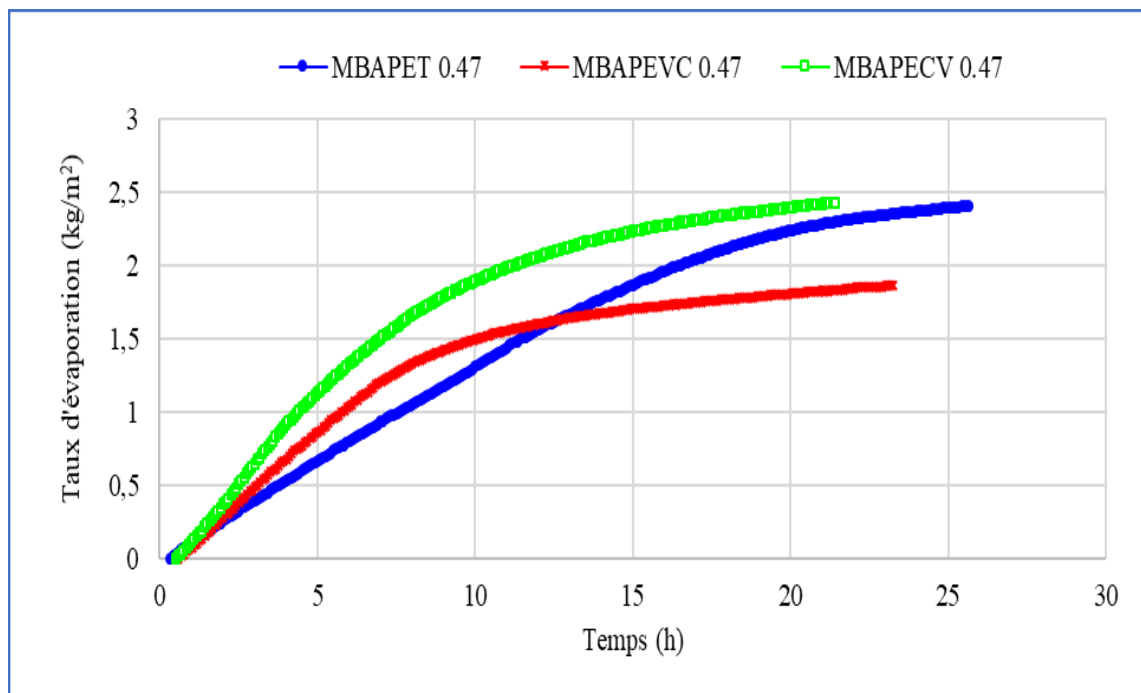


Figure IV.5. Mesure de taux d'évaporation des MBAPE avec E/L=0.47

Les évolutions du taux d'évaporation des mortiers avec les deux rapports E/L= 0.39 et 0.47 sont présentées sur la figure IV.6

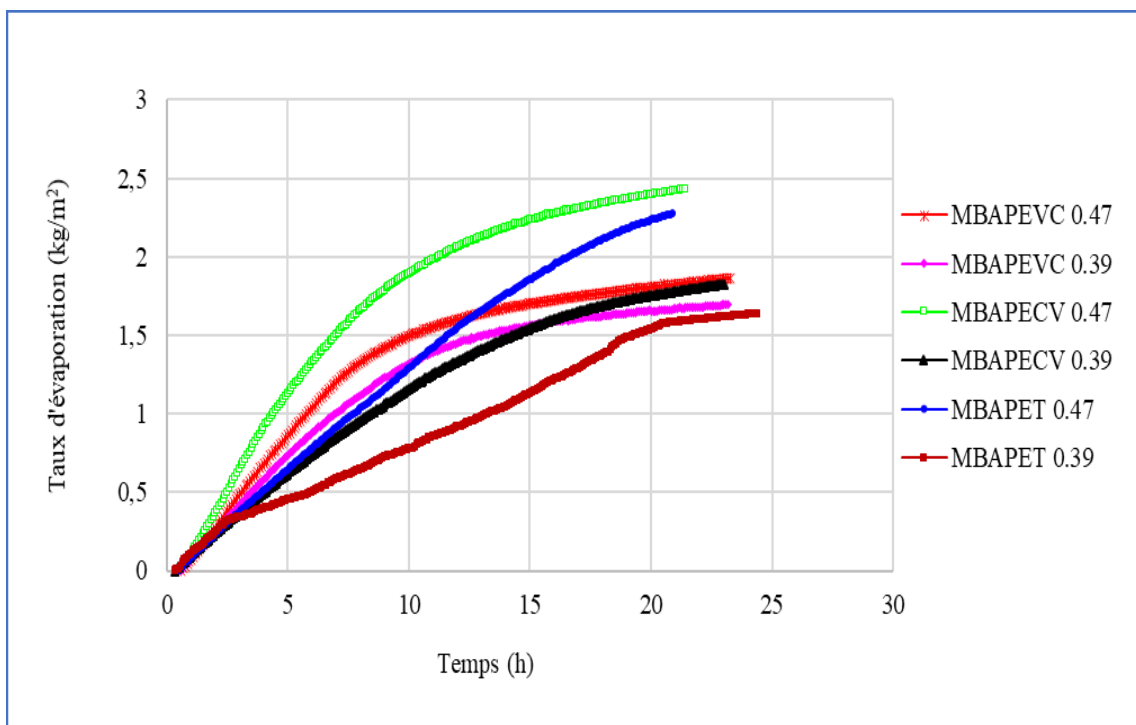


Figure IV.6. Mesure de taux d'évaporation des MBAPE avec les deux rapports E/L.

La comparaison entre les valeurs du taux d'évaporation mesurées pour les différents rapports E/L, où on peut constater que le taux d'évaporation augmente avec l'augmentation du rapport E/L.

En résumé, on peut dire que la vase calcinée utilisée influe sur la cinétique et l'amplitude finale du retrait plastique. Cela peut être expliqué par l'effet physique de la vase calcinée suite à sa grande finesse (8310 cm²/g) en comparaison aux cendres volantes (4334 cm²/g). En fait, il est connu que certaines additions finement broyées peuvent servir de sites de nucléation d'hydratation [2, 3]. Par conséquent, cet effet influence le durcissement et le durcissement du jeune âge [4]. Aussi, peut être expliqué par d'autres types d'influence comme la température et la durée de la calcination (traitement) de cette vase.

IV.3. INFLUENCE DES ADDITIONS MINÉRALES SUR LE RETRAIT LIBRE (TOTAL, EDOGÈNE ET DE DESSICCATION)

IV.3.1. Influence des additions minérales sur le retrait total en fonction du temps

Les évolutions du retrait total des mortiers avec le rapport E/L= 0.39 sont présentées sur la figure IV.7. À partir de ces courbes, on peut noter que les retraits totaux pour les trois formulations de MBAPE ont différents comportements.

La cinétique des déformations du retrait total entre des mortiers MBAPET0.39 et MBAPEVC 0.39 dès le premier jour et jusqu'à 29 jours, sont assez semblables, la différence n'est pas très significative, ils présentent des allures similaires et presque identiques et commencent à se différencier au fur à mesure que nous avançons dans le temps.

Le MBAPEVC 0.39 présente le plus fort retrait en conditions libres au jeune âge jusqu'à 100 jours de séchage à cause de la grande porosité engendrée par les ciments pouzzolaniques. À 100 jours, il atteint 1240 µm/m, par rapport à 680 µm/m pour le MBAPET0.39 et 873µm/m pour le MBAPEVC0.39. Au contraire après une durée de 150 jours le MBAPEVC 0.39 présente le plus fort retrait total en comparaison avec les deux autres mortiers. D'un point de vue quantitatif, les valeurs expérimentales du retrait total à 350 jours, sont les suivantes : 1147 µm/m pour le MBAPET0.39, 1426 µm/m pour le MBAPEVC 0.39, 1500 µm/m pour le MBAPEVC 0.39. On note une légère supériorité pour le MBAPEVC 0.39 par rapport au MBAPVC 0.39 (74µm/m). Il est possible que cette différence de retrait soit associée à

l'activité pouzzolanique latente des cendres volantes, puisque la différence essentielle se produit à partir de 150 jours de conservation.

Le MBAPET0.39 présente le plus faible retrait total pendant les premiers jours et pour toute la durée des essais à cause de sa faible porosité et de la qualité des pores dans ce mortier.

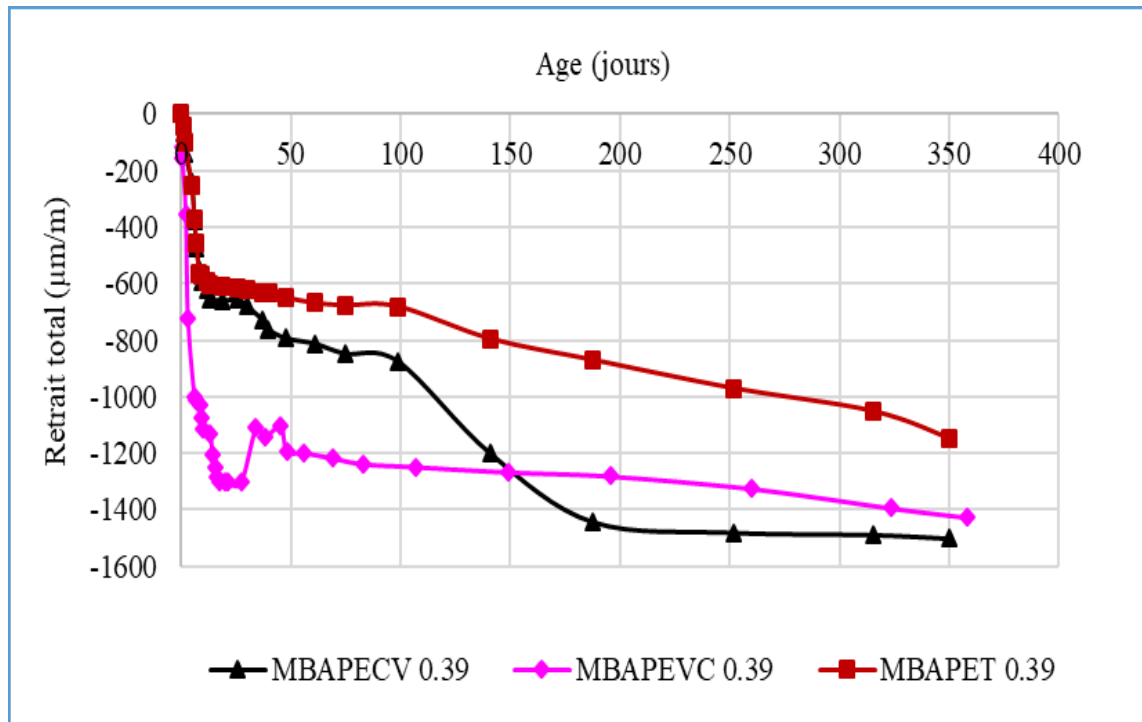


Figure IV.7. Évolution de retrait total des MBAPE du Rapport E/L=0.39

Les évolutions du retrait total des mortiers avec le rapport E/L= 0.47 sont présentées sur la figure IV.8. À partir de ces courbes, on peut noter que les retraits totaux pour les trois formulations de MBAPE ont des comportements distincts. La figure IV.5 montre que le retrait total a changé très rapidement, pour tous les types d'échantillons stockés à l'air libre. Cela peut être attribué à leur taille plus favorable à la dessiccation [5]. Nous avons observé une évolution similaire de la déformation au plus jeune âge (jusqu'aux 7 premiers jours), pour tous les MBAPE, puisqu'au très jeune âge, il était difficile de distinguer les graphiques représentant chaque mortier. Cependant le retrait des MBAPET 0.47 et MBAPEVC 0.47 croît dans un fuseau très serré jusqu'à l'âge de 12 jours, au-delà de cette période, le mortier à base de vase calcinée se détache des deux autres par des valeurs plus élevées, cela peut s'expliquer par les résultats des essais de la tendance à la fissuration par l'essai de l'anneau où le mortier à base de vase calcinée est le premier à se fissurer suivi par le mortier témoin et enfin le mortier à base des cendres volantes.

D'un point de vue quantitatif, les valeurs expérimentales du retrait total à 350 jours, sont les suivantes : 1969 $\mu\text{m/m}$ pour le MBAPET0.47, 1933 $\mu\text{m/m}$ pour le MBAPEVC 0.47, 1575 $\mu\text{m/m}$ pour le MBAPECV 0.47. On note une légère supériorité pour le MBAPET 0.47 par rapport au MBAPVC 0.47 (36 $\mu\text{m/m}$). En revanche le MBAPECV 0.47 est caractérisé par le plus faible retrait total (une différence de 394 $\mu\text{m/m}$ et de 358 $\mu\text{m/m}$, respectivement pour le MBAPET 0.47, le MBAPEVC 0.47).

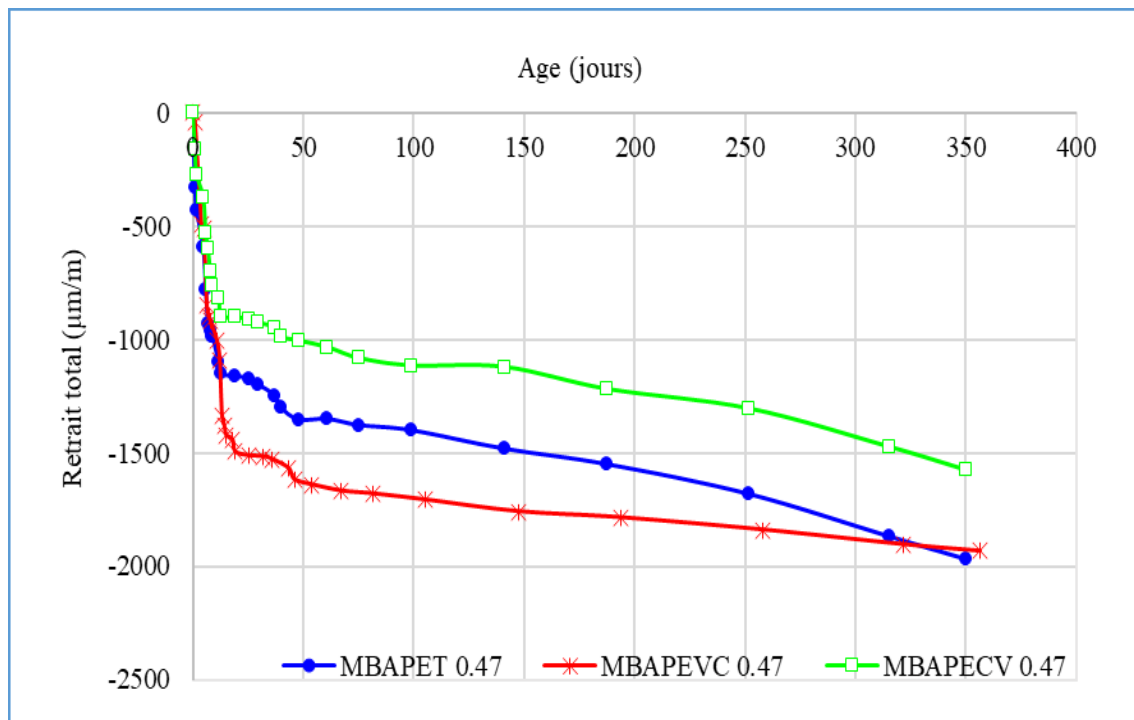


Figure IV.8. Évolution de retrait total des MBAPE du rapport E/L=0.47

IV.3.2. Effet du rapport E/L sur le retrait total en fonction du temps

La figure IV.9 montre les retraits totaux des MBAPE des deux rapports E/l=0.39 et 0.47. On note une différence pour le rapport E/L=0.47, le MBAPET 0.47 et MBAPEVC 0.47 présentent des retraits totaux supérieurs par rapport aux autres mortiers. Cette différence de retrait est peut-être associée aux différences importantes de formulation (différence de rapport E/L). Le MBAPET0.39 présente le moindre retrait total en comparaison avec les autres mortiers.

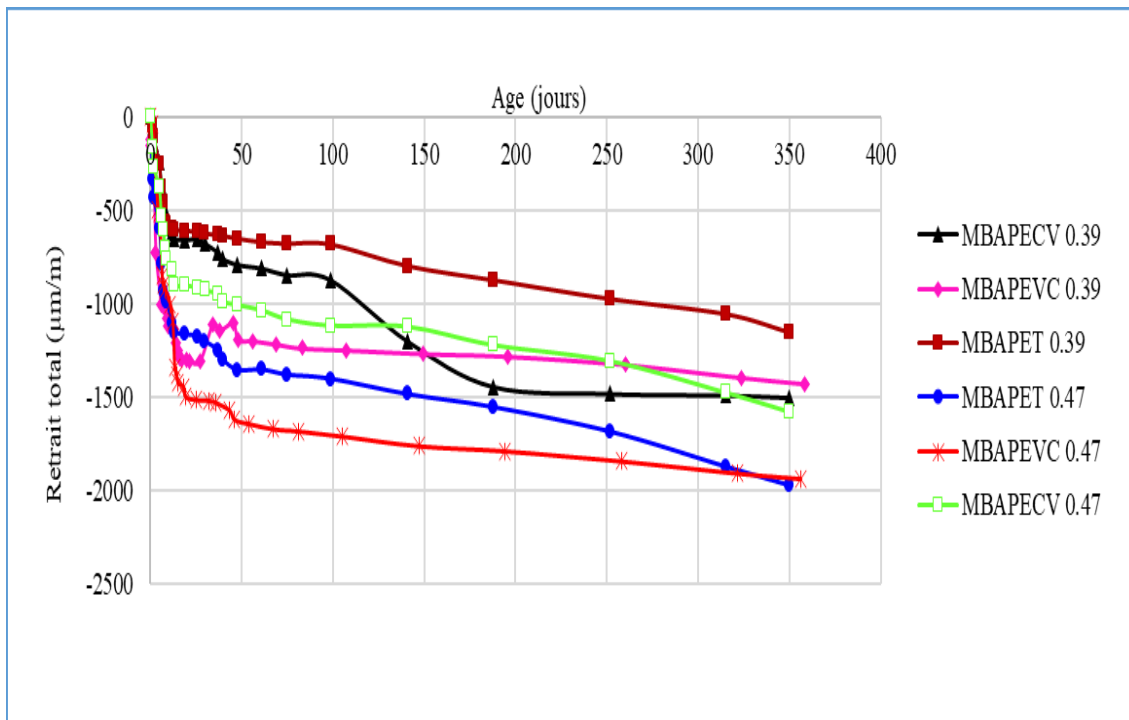


Figure IV.9. Évolution de retrait total des MBAPE avec les deux rapports E/L

IV.3.3. Influence des additions minérales sur le retrait endogène en fonction du temps

Le retrait endogène est un phénomène propre à l'hydratation du ciment qui témoigne de son évolution et de la quantité des hydrates formés. Ce retrait est rapide et croît lorsque la quantité d'eau diminue, il s'achève (95 %) au bout de (1 à 4) semaines [6].

La figure IV.10 illustre l'évolution du retrait moyen mesuré sur des éprouvettes 4x4x16 cm³ protégées de la dessiccation en fonction du temps.

D'après la figure IV.10 le MBAPEVC 0.39 et le MBAPEVC 0.39 ont un retrait endogène plus élevé que celui du MBAPET 0.39. Ceci peut être expliqué par le fait que ces deux mortiers à base de vase calcinée et à base des cendres volantes engendrent une plus forte formation d'hydrates et par conséquent une importante consommation d'eau par l'hydratation. Si l'on se base sur la définition des MBAPE qui contiennent des additions minérales et des adjuvants en proportions plus élevées que dans le cas des mortiers normaux. Ces deux paramètres de composition ont une influence sur l'hydratation du ciment et ces conséquences [7].

En effet ce retrait est attribué à la teneur en CSH laquelle serait relativement plus élevée dans le cas des mélanges de ciment Portland- pouzzolanes [8]. Cette supériorité en présence des additions minérales peut s'expliquer par le fait que le volume des hydrates formés est légèrement inférieur au volume des composants initiaux (eau + ciment). L'hydratation entraîne une diminution de volume après la prise du mortier. On peut donc clairement affirmer que les mortiers contenant des additions minérales révèlent la formation d'hydrates supplémentaires par rapport à ceux dus à l'hydratation du ciment. Si on compare les deux ajouts ensemble, le mortier à base des cendres volantes présente moins de retrait endogène en comparaison avec le mortier contenant de vase calcinée, cela peut être expliqué par une hydratation moins importante et ainsi le développement probable d'une plus faible quantité d'hydrates. En effet, l'éventuelle réaction pouzzolanique de la vase calcinée peut bien en être la cause sans négliger 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 ainsi par des microstructures fines dans lesquels la taille réduite des pores favorise les dépressions capillaires [9]. Ainsi, les tensions capillaires, à l'origine d'un retrait endogène fort seront d'autant plus intenses que les pores sont de faibles diamètres dans le cas d'un rapport E/C faible et d'une résistance en compression élevée. En outre, les réactions pouzzolaniques pourraient affiner la porosité capillaire selon Courard et al. [10]. Sur la base de ces mécanismes à l'origine du retrait endogène, les écarts significatifs dans le cas de nos formulations de MBAPEVC 0.39 et de MBAPECV 0.39 proviendraient donc d'une microporosité plus fine, siège de plus fortes tensions capillaires [11].

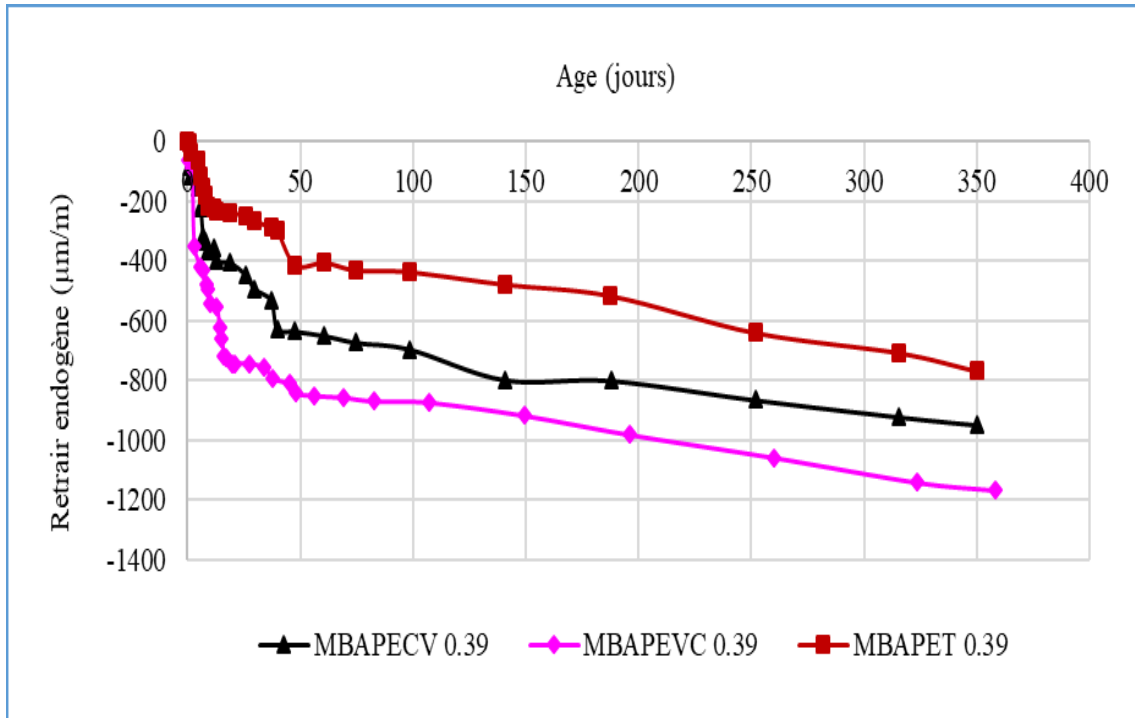


Figure IV.10. Évolution de retrait endogène des MBAPE du rapport E/L=0.39

On peut distinguer sur la figure IV.11 que le retrait endogène évolue rapidement pendant les 20 premiers jours pour réduire son accroissement après cet âge. Tous les mortiers présentent des déformations similaires, dès les premiers jours et pour toute la durée des essais avec une supériorité pour le MBAPET 0.47 à partir de 251 jours.

À 350 jours de mesure, l'ordre de grandeur du retrait endogène est de 1319 $\mu\text{m/m}$ pour le MBAPET 0.47, de 1137.64 $\mu\text{m/m}$ pour le MBAPEVC 0.47 et de 967.58 $\mu\text{m/m}$ pour le MBAPECV 0.47. En tenant compte des dispersions des mesures, on peut dire donc que tous les mortiers ne présentent pas une différence de comportement vis-à-vis du retrait endogène.

Cela est peut-être due au fait que le retrait endogène est un phénomène propre à l'hydratation du ciment qui témoigne de sa cinétique et de la quantité des hydrates formés, la faible quantité d'addition minérale par rapport à celle du ciment ne semble pas influencer cette hydratation et ainsi le retrait endogène [12].

Entre le MBAPECV 0.47 et le MBAPEVC 0.47, on peut constater que la différence est en fonction du type d'addition utilisée dans les formulations du MBAPE. Le MBAPEVC 0.47 présente un retrait supérieur que celui du MBAPECV 0.47, et inférieur par rapport au

MBAPET0.47. Cette différence est due à la réaction pouzzolanique qui modifie l'hydratation de la pâte du ciment en fonction du pourcentage des ajouts.

Le retrait endogène des MBAPE, présente un même développement en fonction des résistances mécaniques, comme décrit précédemment dans ce mémoire dans la partie III chapitre II à la section II.

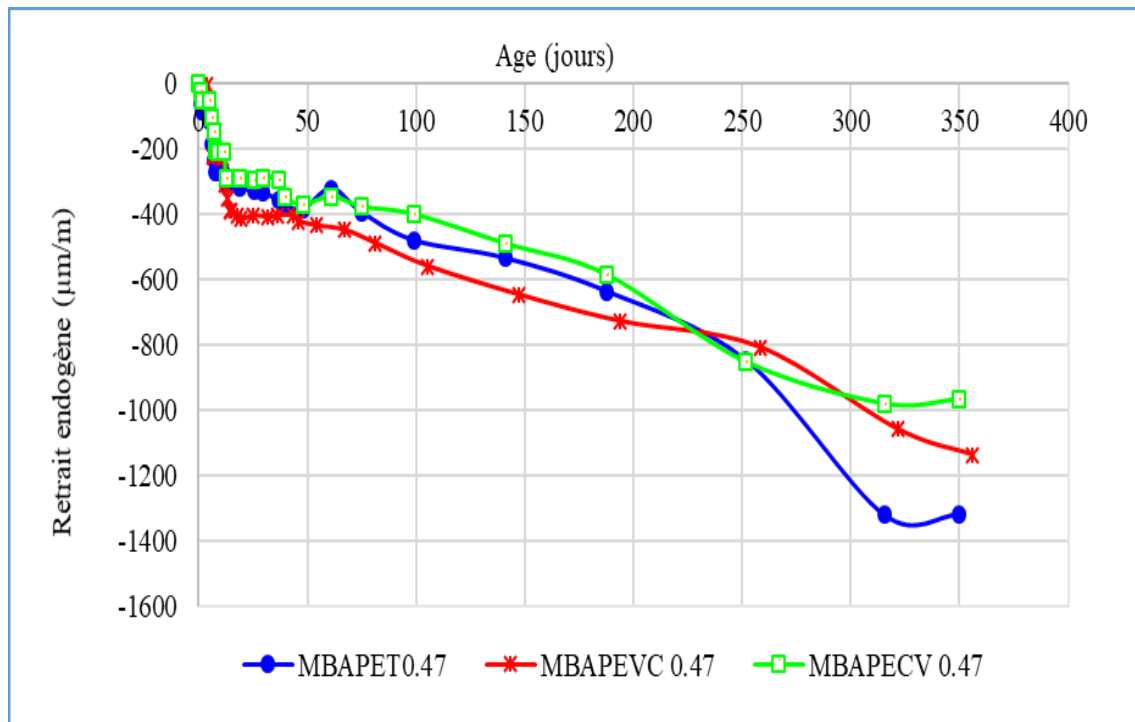


Figure IV.11. Évolution de retrait endogène des MBAPE du rapport E/L=0.47

IV.3.4. Effet du rapport E/L sur le retrait endogène en fonction du temps

Les évolutions du retrait total des mortiers avec les deux rapports E/L= 0.39 et 0.47 sont présentées sur la figure IV.12.

La première remarque concerne la comparaison entre les valeurs du retrait mesurées pour les différents rapports E/L, où on peut constater que le retrait endogène augmente avec l'augmentation du rapport E/L. En effet, de nombreux auteurs [13-18] ont montré que le retrait endogène est plus élevé pour des rapports Eau/Ciment plus faibles. Ce qui n'est pas le cas pour nos mortiers. La différence du retrait endogène remarquée pour les formulations du MBAPE est peut-être attribuée à la densification de la structure poreuse en présence de la vase calcinée qui influence l'hydratation du ciment et également la microstructure et la morphologie des hydrates [19, 20]. En effet, au moment de la prise, une part seulement de

l'hydratation est réalisée. Celle-ci se poursuit ensuite à l'intérieur d'un squelette à la fois poreux et rigide, ce qui entraîne une diminution de la teneur en eau dans l'espace des pores. Au cours de la formation des CSH de la réaction pouzzolanique, la réaction entre la portlandite du ciment et la silice des produits pouzzolaniques consomme une autre partie (en plus de celle consommée par l'hydratation du ciment) de l'eau emprisonnée dans la structure poreuse, ce qui engendre plus de retrait pour les formulations des mortiers à base de vase calcinée. Le faible retrait endogène des mortiers à base des cendres volantes en comparaison avec des mortiers à base de vase calcinée est peut-être dû, à la finesse plus élevée de la vase calcinée par rapport à la cendre volante, puisque plusieurs recherches ont déjà souligné l'influence de ce paramètre sur le retrait endogène [21, 22].

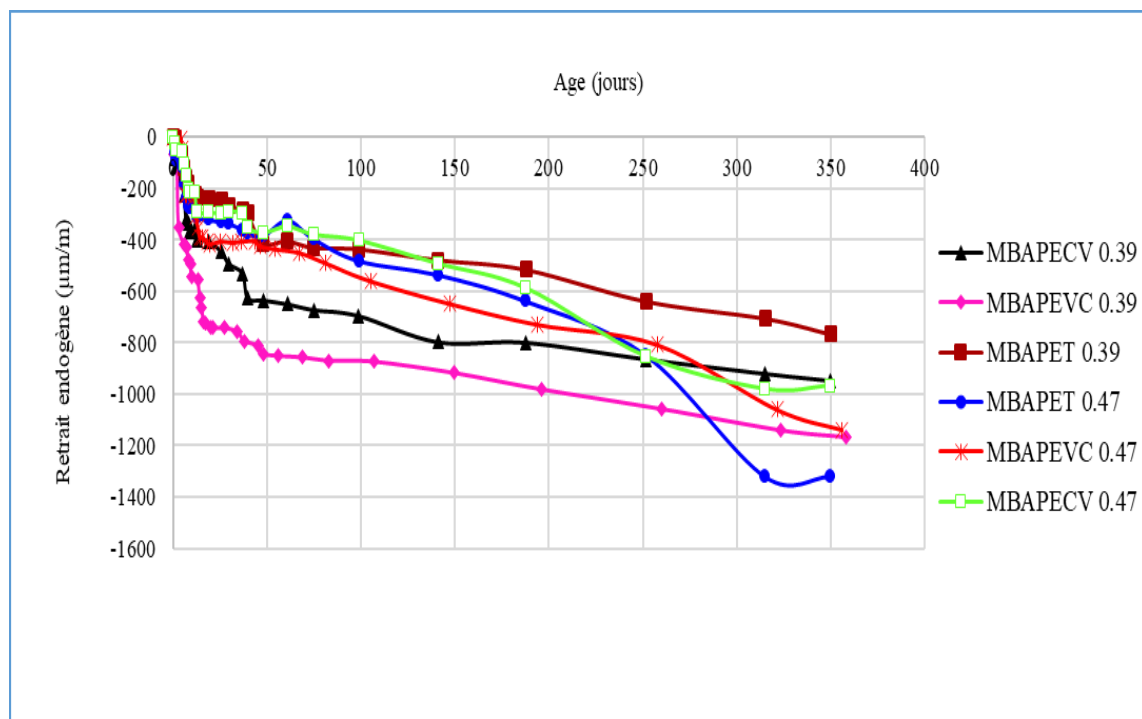


Figure IV.12. Évolution de retrait endogène des MBAPE avec les deux rapports E/L.

IV.3.5. Influence des additions minérales sur le retrait de dessiccation en fonction du temps.

Le retrait exogène représente la déformation des éprouvettes en présence d'un échange hydrique avec le milieu extérieur.

Ce retrait se produit lorsque les surfaces de l'élément sont libres et peuvent échanger l'humidité avec le milieu extérieur. Ceci provoque une perte d'eau à travers les pores de la pâte ce qui atteste de la qualité de la microstructure à conserver ou à perdre son humidité [23].

La figure IV.13 montre le retrait de dessiccation des MBAPE étudiés avec le rapport $E/L=0.39$. Le retrait a tendance à augmenter à un rythme plus élevé aux premières échéances, puis le taux diminue à un âge plus avancé. Le MBAPECV0.39 est susceptible de provoquer une réduction de l'ampleur du séchage jusqu'à 100 jours. Au contraire, une grande différence est notée entre l'âge de 150 et 350 jours, les MBAPET 0.39 et MBAPECV 0.39 présentent des retraits supérieurs par rapport au MBAPEVC 0.39. A 350 jours, l'ordre de grandeur du retrait exogène est de $380.46 \mu\text{m}/\text{m}$ pour le MBAPET 0.39, de $553.37 \mu\text{m}/\text{m}$ pour le MBAPECV 0.39 et de $257.82 \mu\text{m}/\text{m}$ pour le MBAPEVC 0.39, ce qui présente une grande supériorité pour le MBAPECV 0.39 par rapport aux autres mortiers. Selon Turcry et al, [24], à court terme, les cendres volantes ont un effet limité sur le retrait de dessiccation, mais à long terme cette tendance s'inverse. Bouzoubaâ et al [25], ont trouvé un retrait identique même avec la substitution d'une grande quantité de ciment par la cendre volante. Il y a plusieurs facteurs qui doivent être considérés pour expliquer le comportement de retrait de dessiccation des MBAPE observés dans notre étude. Ce sont la teneur en ciment, la teneur en eau et le raffinement des pores dû à la réaction pouzzolanique des cendres volantes. Il est connu que la pâte de ciment est la source de retrait dans le béton et le mortier. Par conséquent, le MBAPE avec une teneur en ciment plus élevée produira un retrait de séchage plus élevé. En parallèle la perte d'eau capillaire due à l'évaporation est contrôlée par la taille des pores interconnectés dans le mortier qui agissent comme canal d'écoulement de l'humidité. Plus d'eau capillaire va facilement se déplacer vers l'environnement de séchage grâce à la taille plus élevée des pores interconnectés. À un âge précoce, la réaction pouzzolanique n'a pas encore eu lieu et, par conséquent, les caractéristiques des pores du MBAPE dépendent de la teneur en eau du mélange, et, au début de l'âge, le retrait de dessiccation dû au mécanisme d'évaporation est le facteur dominant. Le MBAPEVC 0.39 a une teneur en eau plus élevée que les autres, il n'est pas surprenant que le retrait de séchage de ce mortier soit le plus grand.

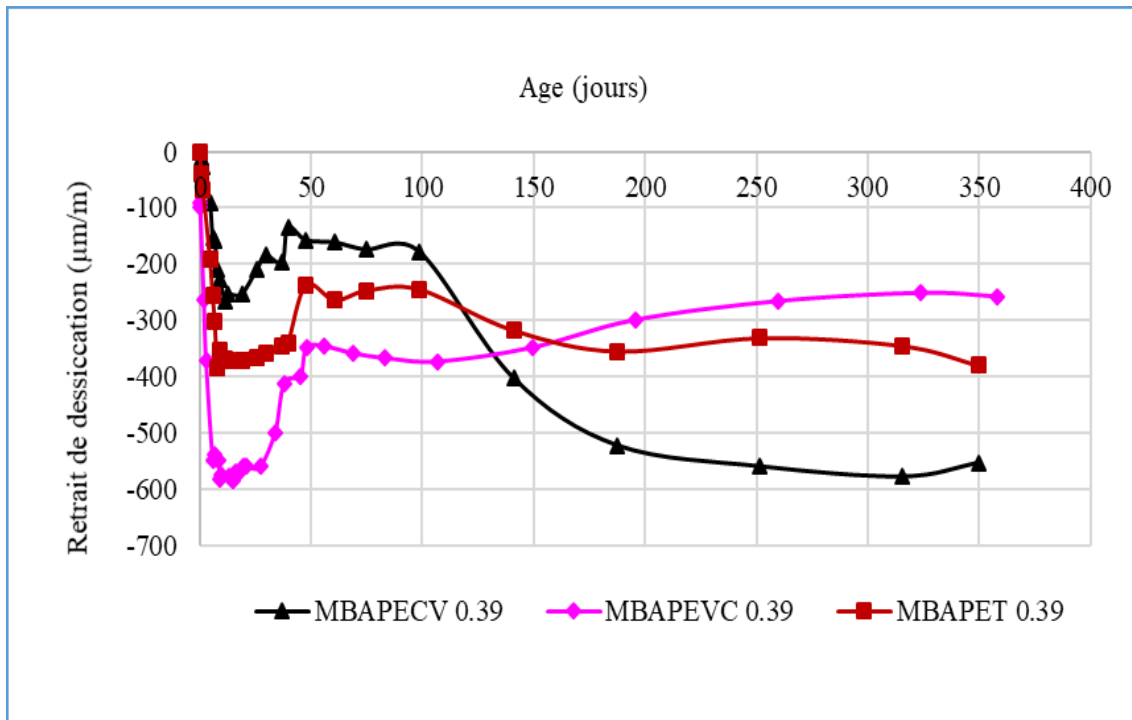


Figure IV.13. Évolution de retrait de dessiccation des MBAPE du rapport E/L=0.39

On constate sur la figure IV.14, que le MBAPECV 0.47 présente les valeurs les plus faibles après la première semaine de durcissement. En revanche le MBAPE à base de vase calcinée présente des valeurs les plus élevées par rapport à celles du témoin et des cendres volantes.

En dessiccation, le retrait est lié à la quantité d'eau évaporable dans la pâte de ciment. Par conséquent, la pâte à base de vase calcinée, est caractérisée par une grande teneur en eau libre et, de ce fait, par un retrait de dessiccation plus important. Le faible retrait de dessiccation du mortier contenant des cendres volantes est prouvé par Atiz et al. [26] qui ont étudié l'évolution du retrait des éprouvettes de mortier ayant un rapport E/C égale à 0.4, ils concluent que le retrait d'un mortier renfermant 10, 20 et 30 % de cendres volantes est réduit respectivement de 25, 37 et 43% après 5 mois d'observation. Ceci est attribué certainement à la forte concentration de la chaux libre et de MgO dans ces cendres.

Chindaprasirt et al [27] ont testé l'effet de la finesse des cendres volantes sur la déformation du retrait de dessiccation, les résultats confirment que tous les mortiers aux cendres volantes présentent un retrait moins important quel que soit la finesse et ceci à cause du besoin en eau

qui se voit être diminué avec la présence de ces cendres. ACI Committee 232 [28], reporte que le retrait des cendres volantes augmente légèrement si le rapport E/C reste constant. Cet écart reste faible pour un taux de substitution inférieur à 20%. De même Mehta [29] confirme qu'aucune différence de retrait n'est observée sur des bétons comportant moins de 25% de cendres volantes. On peut dire que l'addition de la cendre volante limite le retrait de dessiccation.

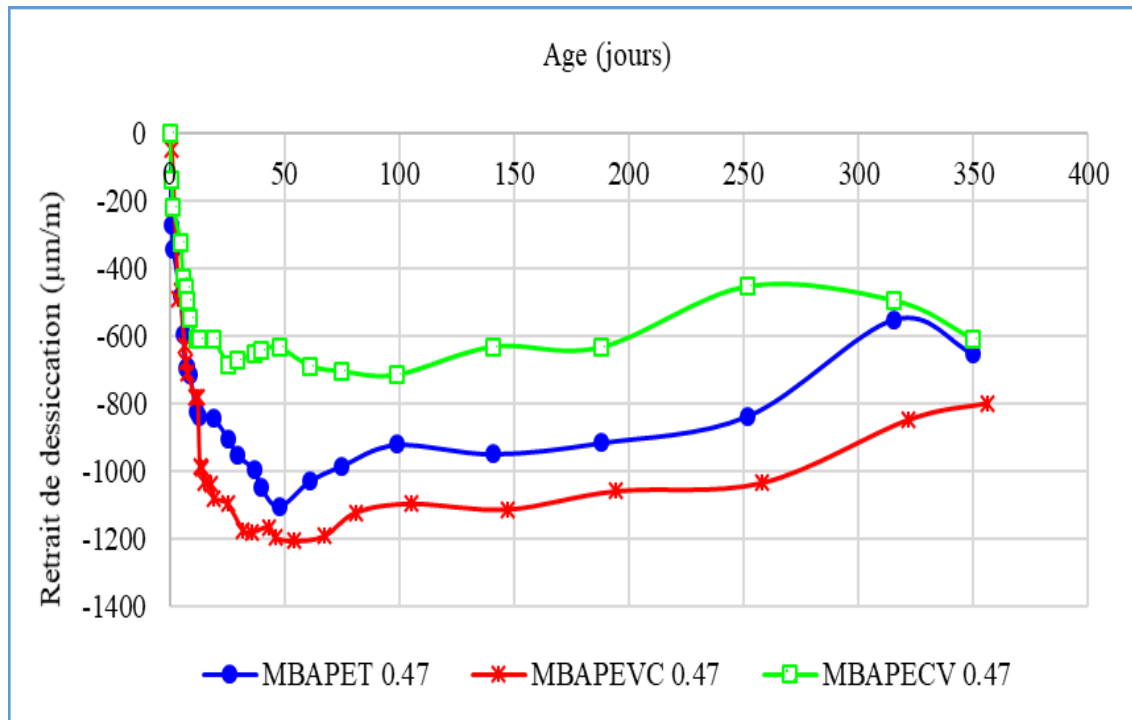


Figure IV.14. Évolution de retrait de dessiccation des MBAPE du rapport E/L=0.47

IV.3.6. Effet du rapport E/L sur le retrait de dessiccation en fonction du temps

Les évolutions du retrait de dessiccation des mortiers avec les deux rapports E/L= 0.39 et 0.47 sont présentées sur la figure IV.15.

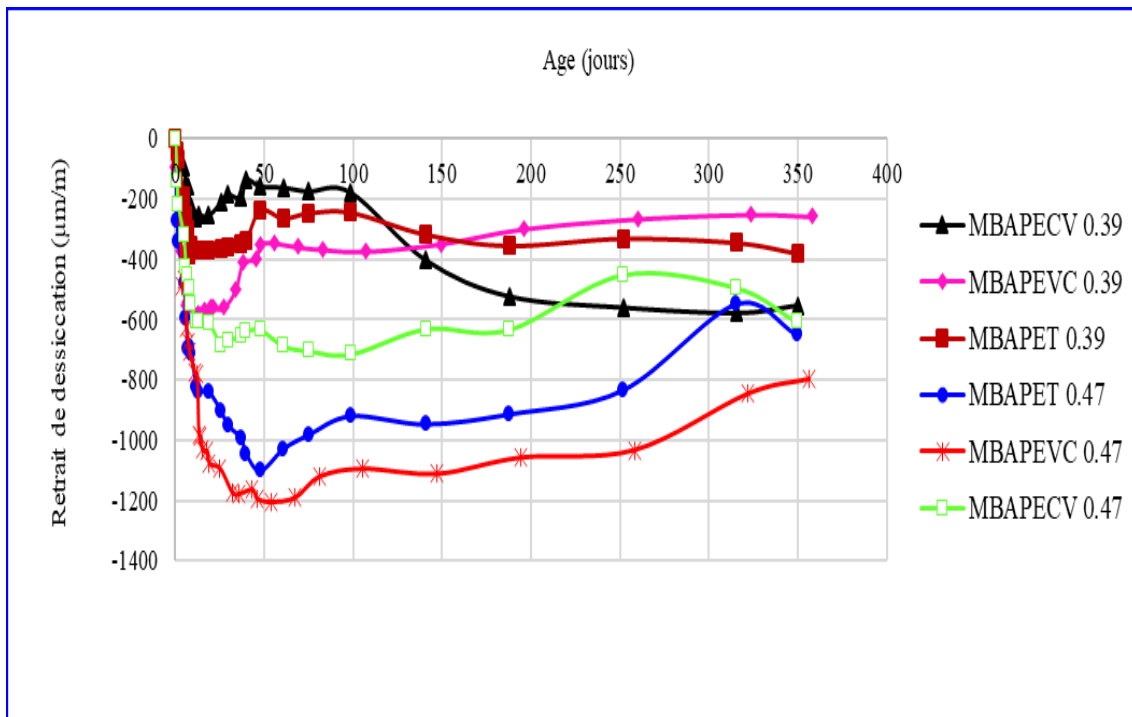


Figure IV.15. Évolution de retrait de dessiccation des MBAPE avec les deux rapports E/L

Le retrait de dessiccation croît avec l'augmentation du rapport E/L, cela est normal puisque le retrait de dessiccation est lié en premier lieu à l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du mortier vers le milieu extérieur. Le dessèchement est d'autant plus fort que la quantité d'eau initiale dans le matériau est grande [30, 21, 17].

Les formulations du MBAPEVC 0.47 et du MBAPET 0.47 présentent les valeurs de retrait de dessiccation les plus élevées. Pendant que les mortiers à base des cendres volantes présentent des valeurs moyennes de retrait. La réduction du retrait de dessiccation par l'addition de la vase calcinée avec le rapport E/L= 0.39 a été observé, cela peut suggérer que l'utilisation de la vase calcinée à faible rapport E/L induit une augmentation de la compacité et par conséquent une baisse des transferts d'humidité.

IV.3.7. Influence des additions minérales sur la perte de masse en fonction du temps

Afin de mieux comprendre les interprétations précédentes du retrait nous avons mesuré en parallèle la perte de masse exprimée en %. Les pertes de masse ont été mesurées sur les éprouvettes destinées aux mesures du retrait total et endogène.

IV.3.7.1. Perte de masse totale

D'après la figure IV.16, on remarque que le MBAPET 0.39 et le MBAPE CV 0.39 exposés au retrait total ont la même cinétique de perte de masse sauf le MBAPE VC 0.39 se détache par rapport aux autres en développant plus de perte. L'analyse des courbes montre que la plus grande partie du retrait a lieu avant 28 jours environ, au-delà de cet âge, il est stabilisé. Ceci s'explique par le fait que la réaction d'hydratation est une réaction exothermique qui participe d'une part au départ d'eau par évaporation d'eau vers l'ambiance extérieure et d'autre part par consommation dans l'action d'hydratation du ciment [31].

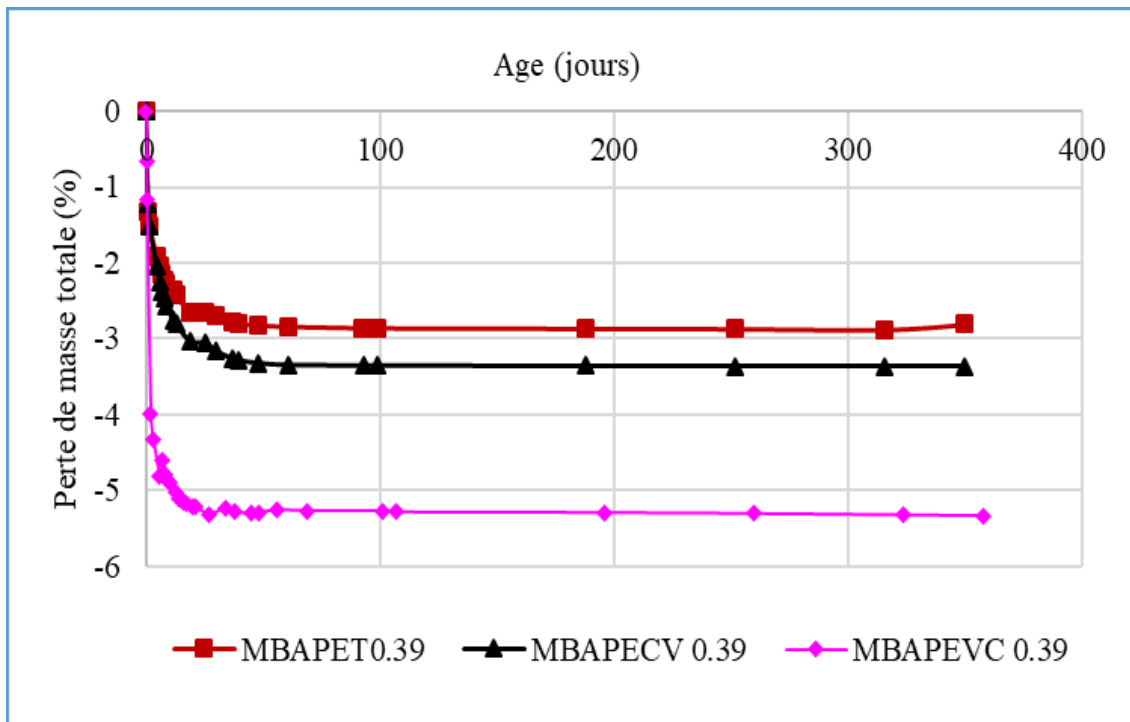


Figure IV.16. Évolution de la perte de masse totale des MBAPE en fonction de temps avec le rapport E/L=0.39

D'après la figure IV.17, on remarque que le MBAPEVC 0.47 et le MBAPECV 0.47 ont la même perte de masse, cependant le MBAPET 0.47 a donné la plus faible perte totale. La cinétique de la perte est très accélérée jusqu' à 20 jours, au-delà de cet âge, elle est stabilisée. En revanche, cette cinétique suit la même cinétique de la largeur de fissure due au retrait empêché (voir section IV.4)

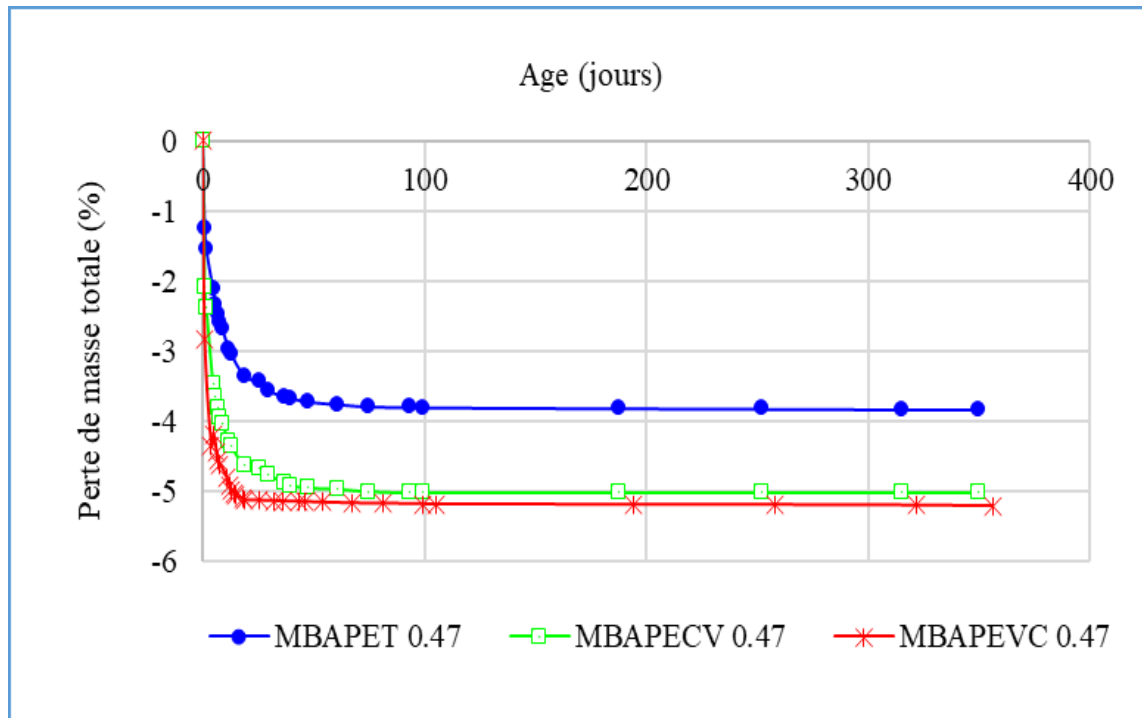


Figure IV.17. Évolution de la perte de masse totale des MBAPE en fonction de temps avec le rapport $E/L=0.47$

IV.3.7.2. Perte de masse endogène

La figure IV.18 montre le développement en perte de masse de MBAPE qui est mesuré sur des éprouvettes exposées à un retrait endogène. Ces pertes de masse sont causées par la consommation interne d'eau par l'hydratation du ciment et des ajouts. D'après la figure IV.18 on observe que tous les MBAPE évoluent de la même façon en fonction du temps.

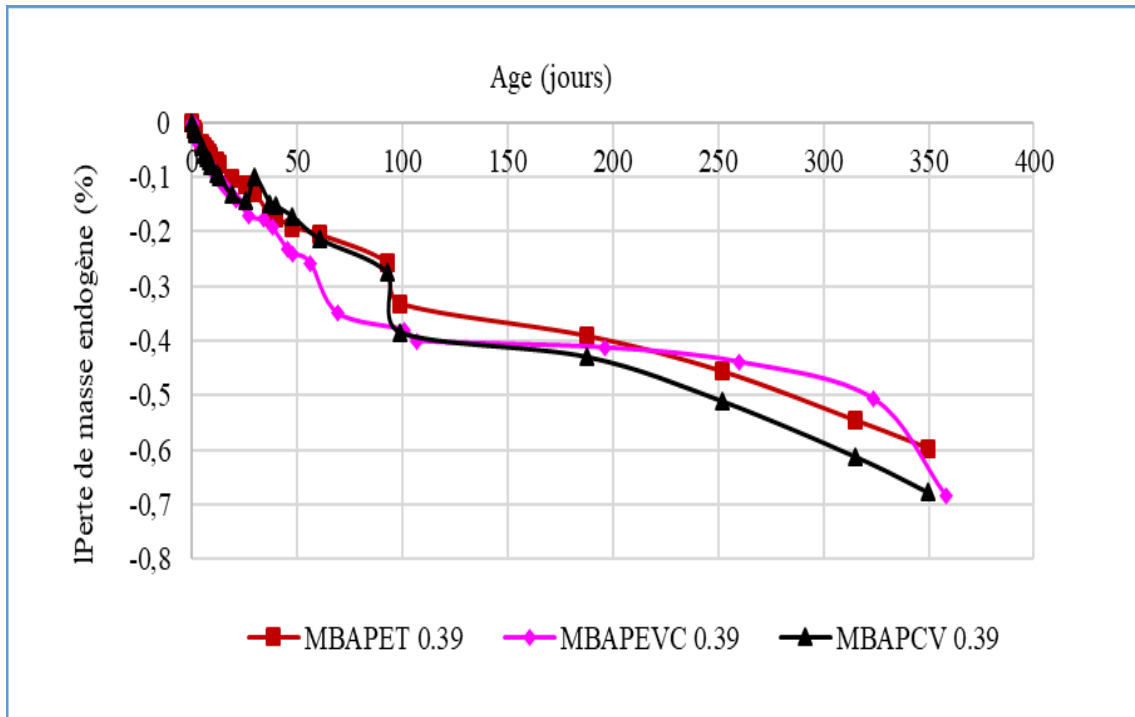


Figure IV.18. Évolution de la perte de masse endogène des MBAPE en fonction de temps avec le rapport $E/L=0.39$

D'après la figure IV.19, on remarque que le MBAPECV 0.47 et le MBAPEVC 0.47 croît dans un fuseau très serré jusqu'à l'âge de 30 jours où les valeurs commencent à converger, excepté pour le MBAPET 0.47 qui présente une évolution à part.

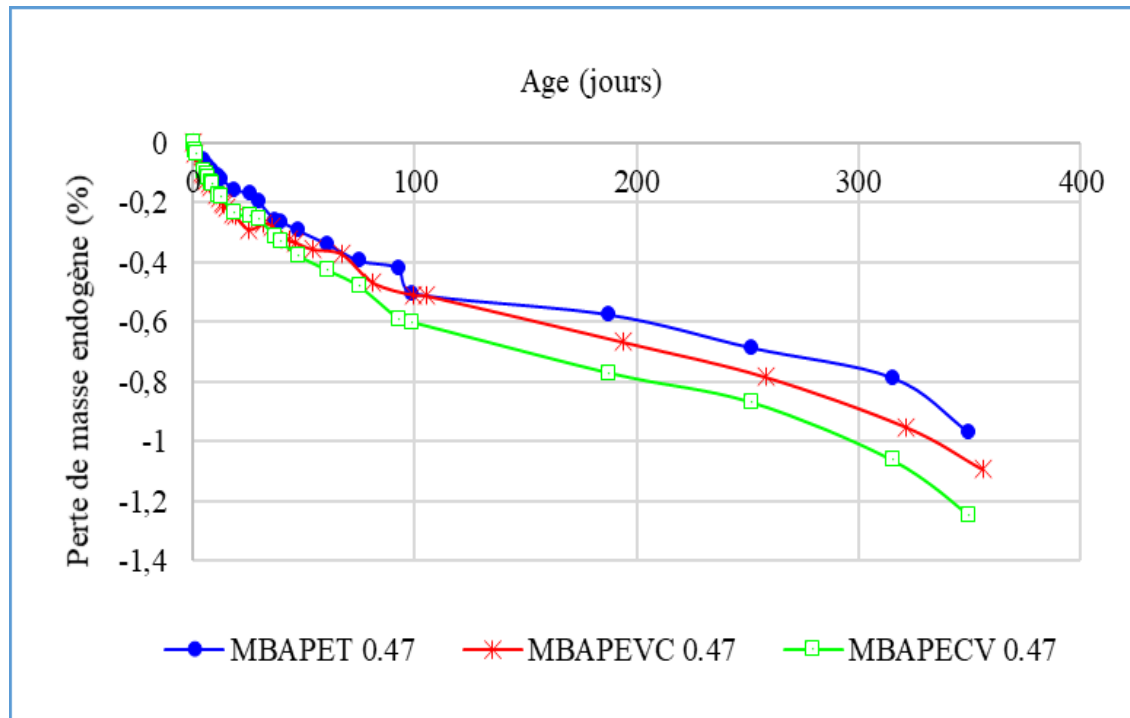


Figure IV.19. Évolution de la perte de masse endogène des MBAPE en fonction de temps avec le rapport $E/L=0.47$

IV.3.8. Effet du rapport E/L sur la perte de masse totale en fonction du temps

Les résultats de la figure IV.20 indiquent que les mortiers avec un rapport E/L de 0,39 présentaient les pertes de masse totales les plus faibles sauf pour le MBAPEVC 0.39. La perte de masse totale augmente lorsque le rapport E/L est augmenté en raison de la teneur élevée en eau qui crée des vides lors du durcissement. Les mortiers contenant de la vase calcinée ont donné la plus grande perte de masse totale en comparaison avec les autres mortiers, ces résultats sont relatifs aux résultats du retrait plastique. Il existait une corrélation directe entre le retrait plastique et la perte de masse totale. En effet, l'augmentation de la perte de masse totale conduit à une augmentation du retrait plastique.

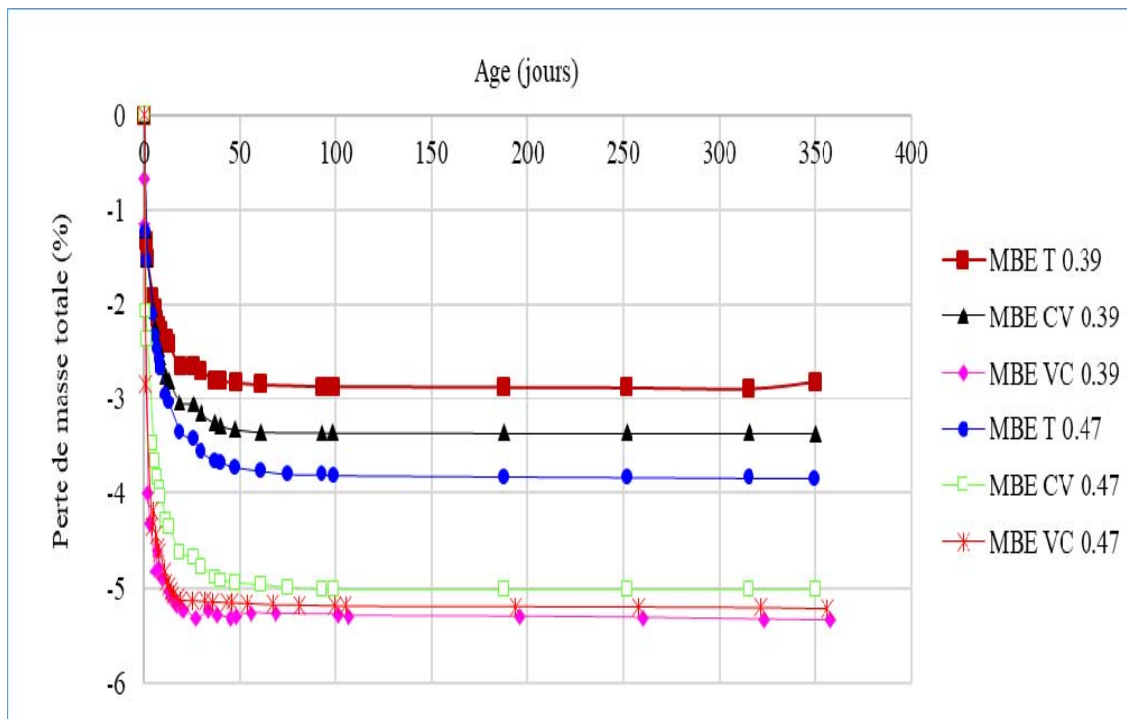


Figure IV.20. Évolution de la perte de masse totale des MBEPE en fonction de temps avec les deux rapports E/L

IV.3.9. Effet du rapport E/L sur la perte de masse endogène en fonction du temps

Les résultats de la figure IV.21 indiquent que les mortiers avec un rapport E/L de 0,39 présentaient les pertes de masse endogènes les plus faibles. La perte de masse endogène augmente lorsque le rapport E/L est augmenté. Il y a pratiquement une proportionnalité de cette perte en fonction du rapport E/L. En effet, il ya une consommation de l'eau due à l'hydratation du ciment.

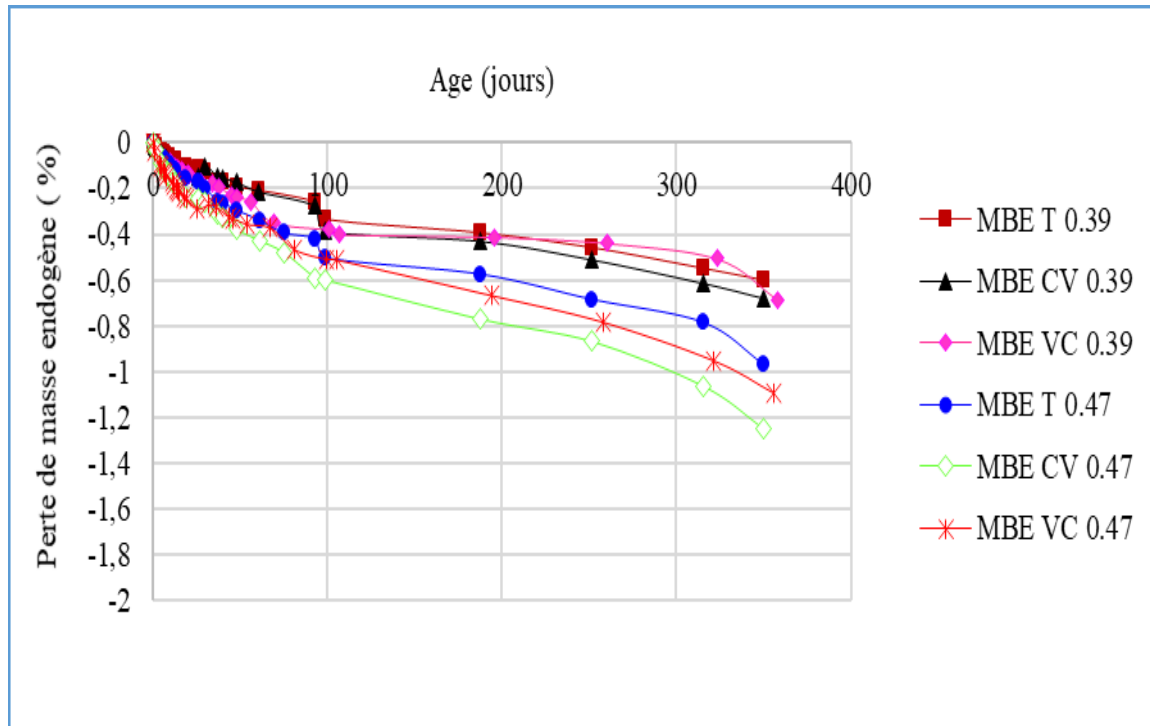


Figure IV.21. Évolution de la perte de masse endogène des MBAPE en fonction de temps avec les deux rapports E/L (0.39 et 0.47)

IV.3.10. Influence des additions minérales sur retrait de dessiccation en fonction de la variation de la masse.

Les figures IV.22 et IV.23 présentent l'évolution du retrait de dessiccation en fonction de la variation de la masse des éprouvettes.

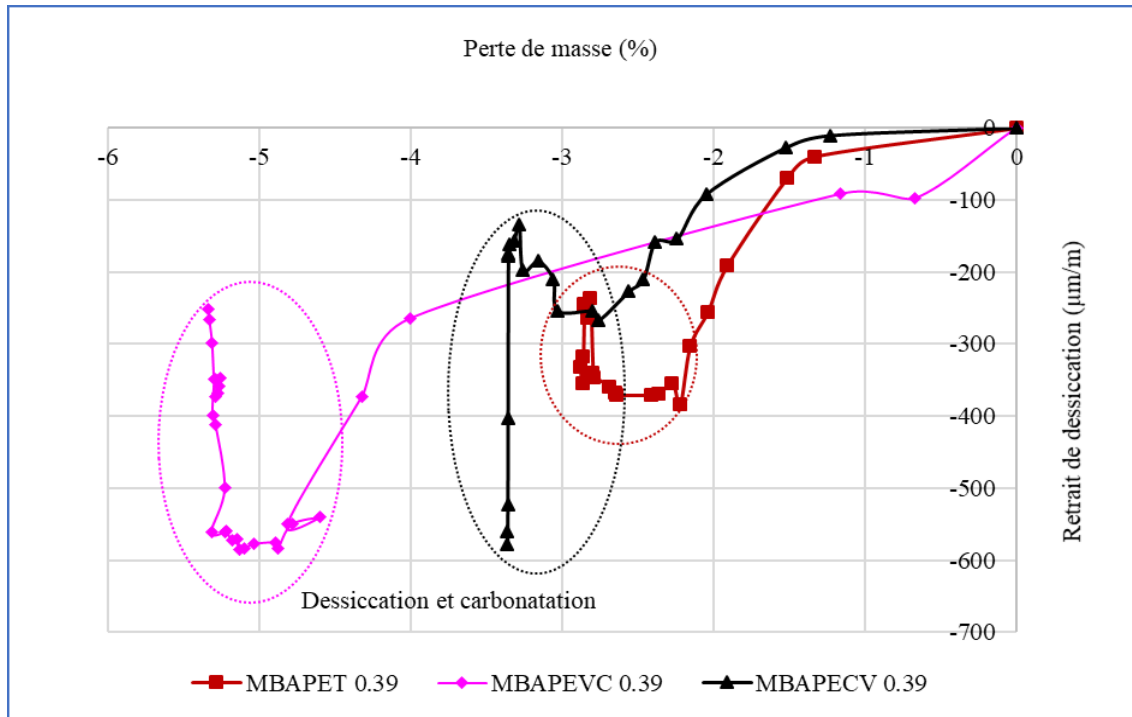


Figure IV.22. Retrait de dessiccation en fonction de la variation de la masse de MBAPE du rapport E/L=0.39

La première constatation notée à partir de la représentation du retrait de dessiccation en fonction de la variation de la masse c'est l'augmentation du retrait de dessiccation de tous les mortiers d'étude en fonction de la variation de la masse. Cependant, on observe en premier lieu une perte d'eau importante qui n'a pratiquement aucune conséquence sur le retrait. Selon GCI [32], au début de retrait exogène, c'est l'eau libre dans les grands pores capillaires ($> 0.05 \mu\text{m}$) qui commence à s'échapper. Cette perte d'eau provoque relativement un faible retrait.

Dans la dernière phase du retrait on constate un gain de poids sur tous les mortiers. Cela est en relation avec le début de carbonatation naturelle des différents mortiers (retrait de carbonatation). Il s'agit dans ce cas d'un couplage entre le retrait de dessiccation et le retrait de carbonatation. Cela signifierait que le retrait global n'est pas à chaque instant, la somme du retrait de dessiccation et des déformations endogènes. En effet, la carbonatation qui est la conséquence du retrait de dessiccation vient relayer les déformations de retrait lié au départ de l'eau et de l'hydratation du ciment [12].

Il faut noter que le retrait de carbonatation se manifeste sans dessiccation puisque l'hygrométrie d'équilibre est la même. De plus, ce retrait est proportionnel au retrait de dessiccation antérieur [12].

En comparant le retrait de dessiccation des MBAPE du rapport E/L=0.39 de la dernière phase (dessiccation et carbonatation), on peut remarquer les mêmes tendances d'évolution entre le MBAPET 0.39 et le MBAPEVC 0.39. Cependant le MBAPEVC 0.39 présente une évolution plus importante que les deux autres mortiers. La figure V.22 montre une cinétique de perte de masse différente. La valeur maximale de la perte de masse est enregistrée pour le MBAPEVC 0.39 (5,33%). Le MBAPET0.39 présente des pertes de masses très faibles par rapport celles des formulations de MBAPEVC 0.39 et MBAPEVC 0.39.

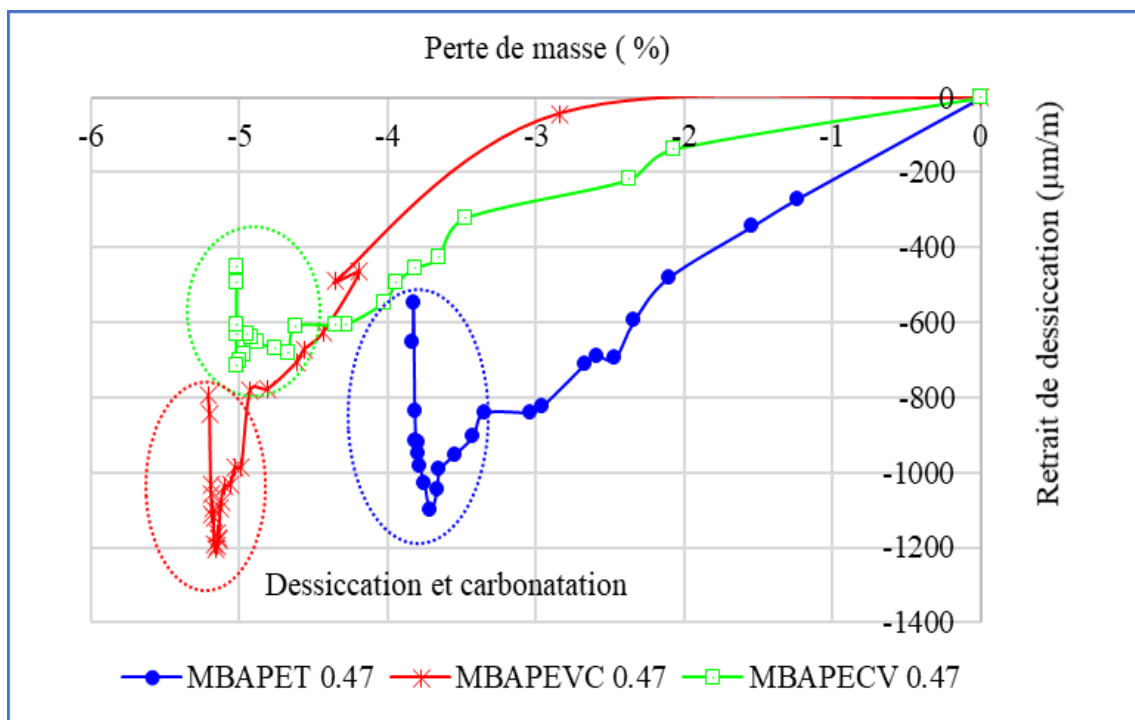


Figure IV. 23. Retrait de dessiccation en fonction de la variation de la masse de MBAPE avec le rapport E/L=0.47

À partir de la figure IV.23 on peut constater que la faible perte de masse est enregistrée pour le MBAPET 0.47 par des valeurs inférieures à celles de MBAPEVC 0.47 et MBAPEVCV 0.47, ces résultats ne concordent pas à celles évoquées pour le retrait total et le retrait endogène. Le

MBAPECV 0.47 et le MBAPEVC 0.47 montrent des pourcentages de perte de masse très proches.

IV.3.11. Effet du rapport E/L sur le retrait de dessiccation en fonction de la variation de la masse

La figure IV.24 présente l'évolution du retrait de dessiccation en fonction de la variation de la masse avec les deux rapports E/L=0.39 et 0.47.

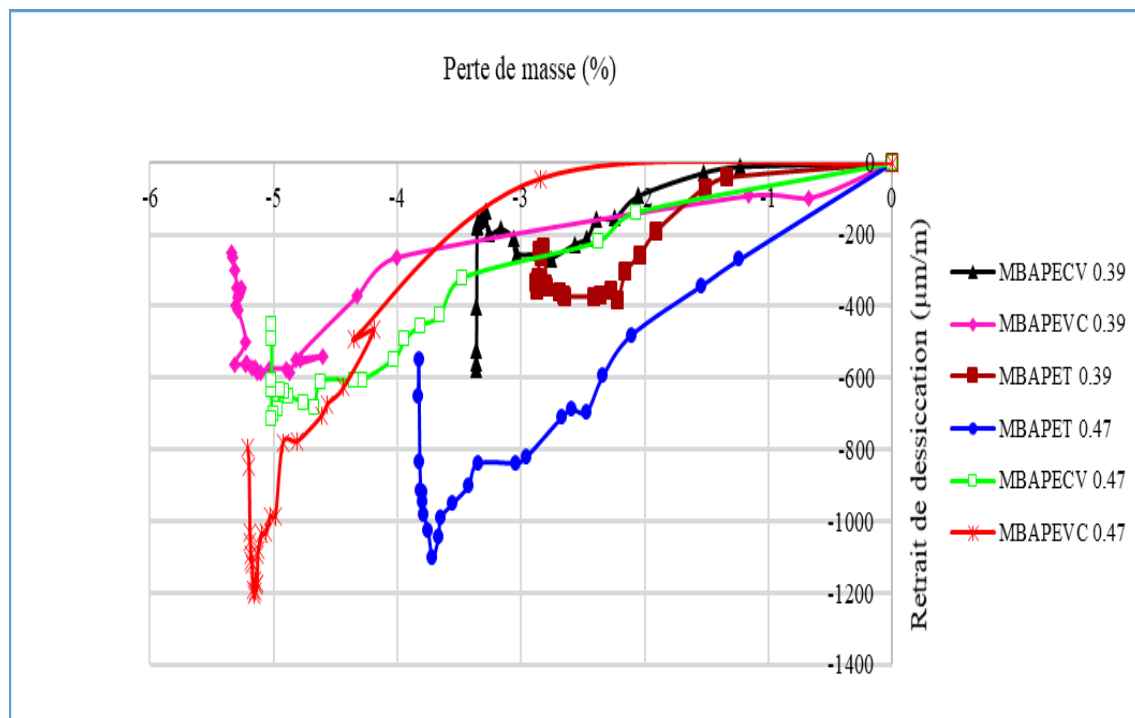


Figure IV. 24. Retrait de dessiccation en fonction de la variation de la masse de MBAPET avec les deux rapports E/L

Les pertes de masse sont bien distinctes entre les MBAPET avec les deux rapports E/L. nous remarquons que la perte de masse est très significative pour les mortiers à base de vase calcinée. Cela peut être expliqué par la grande finesse de la vase calcinée en comparaison avec les cendres volantes et par sa microstructure de la matrice contenant plus d'eau libre, résultat obtenu par mesure thermique de la teneur en eau libre. L'explication sans doute viendrait de l'existence de type d'eau et deux familles de pores : l'eau contenue dans les gros pores partirait sans provoquer de retrait alors que celle contenue dans les petits pores engendrerait les contractions du matériau [33].

IV.4. INITIATION ET DÉVELOPPEMENT DE FISSURES PAR L'ESSAI DE RETRAIT EMPÊCHÉ

Les essais de retrait empêché ont été réalisés dans une période de 49 jours. Le décoffrage a lieu 24 h après la fabrication des MBAPE. La figure IV.25 présente l'évolution des largeurs des fissures des MBAPE avec le rapport E/L= 0.47.

Sous l'effet du retrait empêché, se développent des contraintes de flexion qui lorsqu'elles dépassent la résistance à la flexion du mortier provoque une apparition de fissures [34].

Lors du suivi du retrait empêché à l'anneau en condition de dessiccation, le MBAPE VC 0.47 et le MBAPE T 0.47 ont fissuré plus tôt comme le montre la figure IV.25, d'abord le MBAPE VC 0.47 à l'âge de 2.71 jours après décoffrage, ensuite le MBAPE T 0.47 à l'âge de 2.81 jours (après décoffrage), suivi par le MBAPE CV 0.47 à l'âge de 3.98 jours (après décoffrage). À partir de la figure IV.25, l'ouverture des fissures dues au retrait empêché ont été déterminés par un capteur de fissure. Les résultats obtenus montrent clairement l'âge de l'apparition de la fissure ainsi que l'évolution de son ouverture, et ceci pour tous les MBAPE étudiés. Les fissures peuvent apparaître lorsque la contrainte de traction créée dans le mortier due au retrait empêché dépasse la résistance à la flexion du matériau [35]. Aux premiers âges, cette force se développe encore tandis que les contraintes sont générées par les changements de volume [36]. L'amélioration de la résistance à la flexion du béton fournit une résistance à la fissuration par retrait [37].

Le MBAPEVC0.47 et le MBAPET0.47 ont fissuré plus tôt que le MBAPECV0.47. En revanche, les ouvertures des fissures de MBE T0.47 sont plus petites que celle des MBAPE avec des ajouts minéraux. Le MBAPET0.47 présente une ouverture de la fissure 1.2 et 1.3 fois inférieure à celle du MBECV0.47 et du MBAPEVC0.47 respectivement. Cette réduction peut être expliquée par la plus faible porosité dans le MBAPET0.47 en comparaison avec les deux autres mortiers. Les différences observées dans la largeur de fissuration dans cette étude devraient être liées aux différences dans l'énergie de rupture, la résistance à la traction et la contrainte développée dans les anneaux des mortiers au début de l'âge [35]. L'utilisation de 22% de cendre volante et le rapport E/L=0.47 augmente l'âge de fissuration. Ce résultat peut s'expliquer par les fortes résistances en flexions et plus faibles résistances en compressions du mortier contenant cendres volantes en comparaison avec du mortier à base de vase calcinée.

La résistance à la flexion du mortier contenant la vase calcinée intervient clairement dans la sensibilité à la fissuration, où le MBAPEVC 0.47 a subi des contraintes de flexion plus élevées malgré sa résistance plus élevée, il a fissuré le premier, c'est à dire la contrainte augmente avec fissure précoce. Aussi, on peut se référer à son retrait de dessiccation plus élevé et à son retrait endogène faible, car le retrait de dessiccation est l'un des paramètres majeurs responsables de la fissuration [38].

Les résultats relatifs à la teneur en eau liée ont montré qu'il existait une corrélation indirecte entre la quantité d'eau liée dans le mortier et l'âge de la fissuration. En effet, l'augmentation de la quantité d'eau liée conduit à une diminution de l'âge de la fissuration, augmentant ainsi le risque de fissuration. En effet, cela peut être expliqué par la grande finesse de cette vase qui explique la forte demande en eau et donc une forte teneur en eau liée entraînant le risque d'une fissuration précoce. Nous suggérons un retardateur de prise pour réduire le risque de fissuration. C'est ce que nous avons vu dans les résultats de l'absorption capillaire, les analyses ATG et DRX et les observations au MEB-EDS.

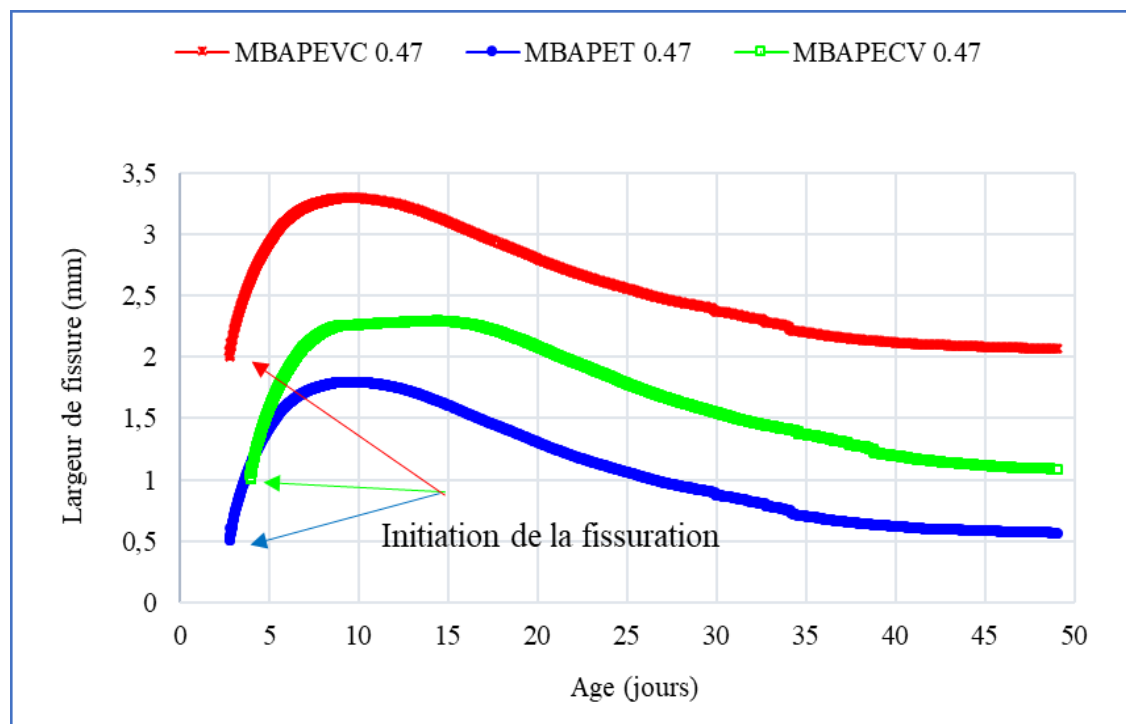


Figure IV.25. Mesure des largeurs des fissures par le capteur de fissure

Remarque : Les tests de la fissuration due au retrait empêché pour le rapport $E/L=0,39$ n'ont pas été effectués, en raison du manque de temps lors de notre stage à courte durée au

laboratoire LGCGM à INSA de Rennes, sachant qu'il y a juste ces 3 moules cylindriques du retrait empêché dans ce laboratoire.

IV.5. CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif d'étudier les déformations différées libres de mortier de béton autoplaçant équivalent à base de vase calcinée ou des cendres volantes et du mortier témoin utilisé comme référence.

Au jeune âge, les MBAPE à base de vase calcinée ont présenté un retrait plastique plus élevés que ceux développés par les MBAPE de référence et des cendres volantes (à 50% d'humidité relative). Toutefois, une cure humide au jeune âge est préconisée pour réduire le retrait plastique.

Les évolutions de retrait total sont sensiblement équivalentes, pour les deux mortiers de vase calcinée et de cendres volantes avec les deux rapports E/L (0.39 et 0.47), alors que le mortier témoin avec le rapport E/L=0.39 est caractérisé par le plus faible retrait total. Ces résultats de retraits totaux confirment le fait que ce type de déformation différée et sa part due à la dessiccation, n'est pas uniquement corrélé au volume poreux accessible à l'eau mais probablement davantage à la forme et à la tortuosité du réseau poreux ainsi qu'à la distribution des tailles de pores [11].

Les retraits endogènes supérieurs pour le MBAPE avec vase calcinée semblent aller dans le sens de l'hypothèse d'une microstructure caractérisée par une porosité plus fine.

La présence de la vase à un taux de 22% fait diminuer le retrait de dessiccation avec le rapport E/L=0.39, cela est le résultat de leur contribution à l'amélioration de la microstructure, mais le mortier témoin avec le rapport E/L=0.39 est caractérisé par le moindre retrait total et endogène, les différences d'évolution du retrait en dessiccation pour chaque mortier sont à mettre en relation avec la microstructure et le réseau poreux. On peut conclure, qu'en général, l'effet du type d'addition minérale sur la cinétique et l'amplitude du retrait des MBAPE est significatif. Le tableau IV.1 résume les résultats des différents retraits mesurés à 350 jours.

Tableau IV.1. Résultats des différents retraits sur les mortiers étudiés à 350 jours.

	Désignation MBAPE	Retrait total mesuré à 350 jours ($\mu\text{m/m}$)	Retrait endogène mesuré à 350 jours ($\mu\text{m/m}$)	Retrait de dessiccation mesuré à 350 jours ($\mu\text{m/m}$)
E/L=0.39	MBAPET 0.39	1147	767	380
	MBAPEVC 0.39	1426	1168	257
	MBAPECV 0.39	1501	947	553
E/L=0.47	MBAPET 0.47	1969	1318	650
	MBAPEVC 0.47	1933	1137	796
	MBAPECV 0.47	1575	967	607

Dans le cas du retrait empêché, une fissure a été observée sur les MBAPE avec le rapport E/L=0.47 à différents âges en fonction des ajouts minéraux : d'abord dans le MBAPEVC 0.47 et dans le MBAPET 0.47 dans le même jour et à des temps rapprochés, puis dans le MBAPECV 0.47. La largeur de fissure des mortiers contenant les ajouts minéraux est supérieure à celle de la fissure du mortier de référence. La présence de la vase traitée dans le mortier de béton autoplaçant équivalent semble augmenter le risque de fissuration précoce par rapport à celui du mortier aux cendres volantes, cela est dû à sa plus faible résistance à la flexion, mais également à son retrait plus important au séchage. En fait, l'augmentation du retrait de séchage entraîne une diminution de l'âge de la fissuration, de sorte que la réduction du retrait de séchage réduit le risque de fissuration. Cependant, la bonne corrélation entre le retrait libre et l'âge de la fissuration doit être analysée avec soin [39]. L'ouverture de la fissure dans le MBAPET 0.7 est au moins 1,2 et 1.3 fois inférieure à celle du MBAPECV 0.47 et MBAPEVC 0.47 respectivement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BELGUESMIA K., BELAS BELARIBI N., AMIRI O., LEKLOU N., BELARIBI O., «Influence of treated sediment substitution percentage on workability», strength and porosity of SCC. *J. Mater. Eng. Struc.* 5, 47–55, 2018.
- [2] CHENG-YI H., FELDMAN R.F., «Hydration reactions in Portland cement-silica fume blends». *Cem. Concr. Res.* 15 (1985) 585–592. Doi: 10.1016/0008-8846(85)90056-0.
- [3] GUTTERIDGE W.A., DALZIEL J.A., «Filler cement: The effect of the secondary component on the hydration of Portland cement: Part 2: Fine hydraulic binders, Cem». *Concr. Res.* 20 (1990) 853–861. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/00088846\(90\)90046-Z](http://dx.doi.org/10.1016/00088846(90)90046-Z).
- [4] AMAR M., BENZERZOUR M., ABRIAK N., «Towards the establishment of formulation laws for sediment-based mortars». *Journal of Building Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.12.011>.
- [5] BOUHAMOU N., MOSTEFA F., MEBROUKI A., BELARIBI N., MESBAH A.H., «Étude du comportement d'un béton autoplaçant à base de vase de dragage vis-à-vis du retrait». *Colloque 01 Eco matériaux*. 24-28 Novembre, (2014).
- [6] ACKER P., « Comportement mécanique du béton : apports de l'approche physico-chimique ». *Rapport de Recherche LPC*, N°152, Juillet (1988), 122p.
- [7] CHOPIN D., FRANCY O., LEBOURGEOIS S., ROUGEAU P., « Creep and shrinkage of heated-cured». *Self compacting concrete (SCC) 3rd international RILEM Symposium Self-COMPACTING CONCRETE*.P.672-683, Reykjavik, Island, 2003.
- [8] MEHTA P.K., «Pouzzolanes naturelles, dans, matériaux complémentaires en cimentation». Éditeur V.M. Malhortra, 1987. pp.3-38.
- [9] AMBROISE J., MAXIMILIEN S., PERA J., «Properties of metakaolin blended cements». *AdvCem Based Mater* 1994; 1– 4:161–8.
- [10] COURARD L., DARIMONT A., SCHOUTERDEN M., FERAUCHE F., WILLEM X., et DEGEIMBRE R., «Durability of mortar modified with metakaolin». *Cement and Concrete Research*, 33(9): 1473–1479. Doi : 10.1016/S0008-8846(03)00090-5, 2003.
- [11] AYED K., BENAÏSSA A., VIDAL T., and PONS G., « Étude du retrait et du fluage des bétons autoplaçants à base de pouzzolanes naturelles et de fines siliceuses algériennes ».

- [12] **SIAD H.**, « Influence du type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants ». Thèse de doctorat, INSA de Renne, France, 2010.
- [13] **PERSSON B.**, «Quasi-instantaneous and long-term deformations of high-performance concrete with sealed curing». *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 8, pp. 1-16, 1998.
- [14] **TAZAWA E.I., SATO R., SAKAI E., MIYAZAWA S.**, «Work of JCI on autogenous shrinkage». *Shrinkage of Concrete Shrinkage 2000*, Edited by Baroghel-Bouny et Aïtcin, Proceedings of the International RILEM Workshop.
- [15] **IGARASHI S.I, BENTUR A., KOVLER K.**, «Autogenous shrinkage and induced restraining stresses in high-strength concretes». *Cement and Concrete Research*. Vol. 30, pp.1701-1707, 2000.
- [16] **TURCRY P.**, « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants, influence de la formulation ». Thèse de l'Université de Nantes, 2004.
- [17] **ROZIERE E.**, « Étude de la durabilité des bétons par une approche performancielle ». Thèse de doctorat. L'École Centrale de Nantes, 2007.
- [18] **PERTUE A.**, « Étude expérimentale du retrait endogène, du fluage propre et de la fissuration des matrices cimentaires aux jeune et très jeune âges ». Thèse de doctorat, l'iut de saint Nazaire, France, 2008.
- [19] **YURTDAS I.**, « Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux à matrice cimentaire : étude expérimentale sur mortier ». Thèse de doctorat. École Centrale de Lille (France), 2003.
- [20] **GHRICI M., KENAI S., SAID-MANSOUR M.**, «Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements». *Cement & Concrete Composites* 29 (2007) 542–549.
- [21] **LOSER R., LEEMANN A.**, « Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete ». *Materials and Structures* 2009, 42(1), 71-82.

[22] **BELGUESMIA K.**, « Optimisation d'un éco-BAP à base de sédiment de dragage vis-à-vis des états frais, durci et de la durabilité ». Thèse de doctorat, Université des sciences et de technologie, Mostaganem, 2018.

[23] **ITIM A., EZZIANE K., KADRI E.**, « Étude des déformations de retrait d'un mortier contenant différentes additions minérales ». (SICZS, 2010) Symposium International sur la Construction en Zone Sismique Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), 26 – 27 octobre (2010).

[24] **TURCRY P., ROZIERE I., LOUKILI A.**, « XXIII^{ème} rencontres universitaires de génie civil », risque et environnement, 2005.

[25] **BOUZOUBAÂ N., LACHEMI M.**, «Self Compacting Concrete Incorporating High-Volumes of Class F Fly Ash: Preliminary Results». Cement and Concrete Research. Vol. 31, No. 3, Mar. 2001, pp. 413-420.

[26] **ATIS C.D., KILIC A., SEVIM U.K.**, «Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high calcium fly ash». Cement and Concrete Research. Vol 34. N°1, 2004, pp.99-102.

[27] **CHINDAPRASIRT P., HOMWUTTIWONG S., SIRIVIVATNANON V.**, «Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulphate resistance of blended cement mortar». Cement and Concrete Research. Vol 34, N°7, 2004, pp.1087-1092.

[28] **ACI COMMITTEE 232**, «Use of fly ash in concrete, Manual of concrete practice». ACI 232.2R-96, 33p.

[29] **MEHTA P.K.**, «Pozzolanic and cementitious by-products in concrete: Another look». Proceedings of the 3th CANMET/ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Trondheim, Norway, 1989, pp.1-43.

[30] **ASSIE S.**, « Durabilité des bétons autoplaçants ». Thèse de doctorat, INSA Toulouse, 2004.

[31] **BELARIBI O.**, «Comportement d'un béton autoplaçant vis-vis des attaques chimiques». Thèse de Magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf U.S.T.O Oran, (2009).

- [32] GCI – 714, « Cours : Durabilité et Réparations du Béton ». Université de Sherbrooke, CANADA, Juillet 2009.
- [33] NEVILLE A., « Propriétés des bétons ». Centre de recherche international du béton éditions eyrolles. Traduction crib, Sherbrooke, Canada, 2000.
- [34] MESBAH H., «Improvement of the behavior of mortars based on recycled aggregates by addition of fibers», PhD Thesis, University of Artois 1997.
- [35] NIKNEZHAD D., «Contribution to the study of mechanical behavior, shrinkage and transport properties of self-compacting concretes with mineral additions, numerical and experimental approach», PhD thesis, INSA Rennes 2015. <http://www.theses.fr/2015ISAR0035>.
- [36] NIKNEZHAD D., KAMALI-BERNARD S., MESBAH H-A., «Self-Compacting Concretes with Supplementary Cementitious Materials: Shrinkage and Cracking Tendency». Amer. Soc. Civ. Eng. Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001852; 2017.
- [37] GRZYBOWSKI M., SHAH S.P., «Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete». ACI. Mater. J. 87(2), 138–148. Doi- 10.14359/1951, 1990.
- [38] SAMOUH H., ROZIÈRE E., LOUKILI A., «Interpretation of the measures of drying shrinkage of self-compacting concrete (SCC) ». XXX^e AUGC-IBPSA Meeting Chambéry, Savoie. Doi: 10.13140/2.1.1348.3044, 2012.
- [39] ROZIÈRE E., GRANGER S., TURCRY PH., LOUKILI A., « Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete». Cem. Concr. Compo. 29(8): 626-636. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.03.010, 2007.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les mortiers de béton autoplaçant équivalent (MBAPE), développés depuis 2003, sont encore à l'heure actuelle qualifiés de « nouveaux mortiers » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement. Ceci est principalement dû à leur coût plus élevé, leur sensibilité à la fois à la ségrégation et à la fissuration due à leur plus fort retrait. Les MBAPE se distinguent des mortiers ordinaires principalement par un dosage en éléments fins plus important, ce qui explique leur coût plus élevé. L'utilisation d'additions minérales, moins coûteuses que le ciment Portland, se développent de plus en plus pour des raisons économiques mais également environnementales. La synthèse bibliographique nous a permis de constater que les travaux publiés concernant l'effet des sédiments de dragage des barrages sur le retrait des MBAPE sont très peu nombreux. A partir des quelques recherches qui prennent en considération le type et la quantité d'ajout, nous avons remarqué des résultats contradictoires notamment au sujet du retrait des mortiers ou des BAP. Ceci est probablement dû à la multiplicité des paramètres entrant en jeu dans la formulation et à la diversité de la composition chimique et minéralogique des additions. D'une façon plus générale, il existe un manque de données sur l'effet du remplacement partiel du ciment dans le MBAPE par des sédiments de dragage des barrages. Aussi, alors que la vase calcinée est reconnue comme une addition pouzzolanique intéressante, les études relatives à son utilisation dans les MBAPE sont très limitées. Plus important encore, leur retrait à court et à long terme est encore très peu étudié dans la littérature.

Afin d'apporter des éléments de réponse à ces besoins et ces données manquantes, nous avons mené une étude sur 6 formulations de MBAPE, élaborées à partir d'un même pourcentage (22%) d'addition minérale (vase calcinée ou cendres volantes) et deux rapports E/L (0.39 et 0.47) : MBAPET0.39, MBAPEVC0.39, MBAPECV0.39, MBAPET0.47, MBAPEVC0.47, MBAPECV0.47. Les formulations retenues sont celles de Mesbah [1] pour deux bétons autoplaçants contenant des cendres volantes (BAP2 avec E/L=0.39 et BAP5 avec E/L= 0.47). Le sédiment utilisé provient du barrage de Chorfa II, il est soumis à la calcination à 750°C pendant 5 heures [2] pour le rendre actif.

L'effet des additions minérales sur l'évolution de la microstructure, sur la résistance à la compression et à la flexion, sur le retrait plastique, la fissuration due au retrait empêché avec $E/L=0.47$ et le retrait libre a été quantifiée. La mesure et l'analyse de l'absorption capillaire, la porosité accessible à l'eau ont été étudiées.

Les résultats de l'étude à l'état frais par la mesure de l'étalement pour toutes les formulations du MBAPE ont permis de les définir comme des MBAPE ayant une ouvrabilité optimale et une absence de ressuage et de ségrégation.

Une augmentation du temps de prise avec l'incorporation des ajouts minéraux (vase calcinée et cendres volantes) par rapport au ciment seul est due à la plus faible chaleur d'hydratation des mortiers avec ajouts ; conséquence d'une plus faible teneur en clinker et aussi due à la plus faible hydraulité de ces deux ajouts à court terme.

Les résultats des mesures de l'eau liée et libre ont montré que les MBAPE avec additions présentent une activité pouzzolanique importante de la pâte à base de vase calcinée comparée à celle de la pâte à base des cendres volantes, résultat qui corrobore bien avec les analyses DRX, analyse ATG-DTG et observations au MEB -EDS.

Les résultats de l'étude des propriétés mécaniques et des déformations de retrait des différents MBAPE au jeune âge puis sur échantillons durcis a mis en évidence les points suivants :

- Le remplacement partiel du ciment Portland par 22% de sédiment traité ou par 22% des cendres volantes a impliqué une diminution de la résistance à la compression par rapport à celle du MBAPE de référence qui peut être expliquée par un faible développement des hydrates au jeune âge. Néanmoins, à toutes les échéances, le MBAPE avec vase calcinée a présenté des meilleures résistances à la compression que celle du MBAPE avec des cendres volantes.
- En ce qui concerne la résistance à la flexion, les valeurs obtenues à 90 jours de conservation ont été très proches, voire meilleures selon le même rapport E/L . Ce qui signifie pour ces mesures, que l'effet du type de l'addition minérale utilisée dans les MBAPE est secondaire au moyen terme.
- Au jeune âge, les MBAPE à base de vase calcinée ont présenté des retraits plastiques plus élevés que ceux développés par les MBAPE de référence et avec cendres volantes

(à 50% d'humidité relative). Toutefois, une cure humide au jeune âge est préconisée pour réduire le retrait plastique.

- À long terme dans des conditions de séchage, le retrait total est sensiblement équivalent, pour les deux mortiers de vase calcinée et de cendres volantes avec les deux rapport E/L (0.39 et 0.47), alors que le mortier témoin avec le rapport E/L=0.39 est caractérisé par le plus faible retrait total. Les retraits endogènes supérieurs pour le MBAPE avec vase calcinée semblent aller dans le sens de l'hypothèse d'une microstructure caractérisée par une porosité plus fine.
- La présence de la vase à un taux de 22% fait diminuer le retrait de dessiccation avec le rapport E/L=0.39 à long terme, mais le mortier témoin avec le rapport E/L=0.39 est caractérisé par le moindre retrait total et endogène, les différences d'évolution du retrait en dessiccation pour chaque mortier sont à mettre en relation avec la microstructure et le réseau poreux.

Les écarts remarquables dans l'étude du retrait libre nous ont permis de conclure qu'en général, l'effet du type d'addition minérale sur la cinétique et l'amplitude de retrait des MBAPE est significatif et que la comparaison entre les formulations du MBAPE à base d'additions minérales et du MBAPET est liée en premier lieu au type de l'addition minérale utilisée dans les MBAPE et en deuxième lieu au rapport E/L.

- Dans des conditions de retrait empêché avec le rapport E/L=0.47, une seule fissure a été observée sur les MBAPE et à différents moments : d'abord dans le MBAPEVC et dans le MBAPET, puis dans le MBAPECV, montrant ainsi la sensibilité du MBAPE à base de vase calcinée à la fissuration précoce. Cela est dû à sa plus faible résistance à la flexion, mais également à son retrait plus important au séchage et à son retrait endogène plus faible au jeune âge. Toutefois, l'effet des additions sur l'ouverture de la fissure est significatif, où le MBAPET est au moins 1.2 et 1.3 fois inférieure à celle du MBAPECV et MBAPEVC respectivement.

Les résultats de l'étude de la porosité ouverte et de l'absorption capillaire des 6 MBAPE a permis de montrer que :

- Les MBAPECV ont montré des porosités inférieures à celles des MBAPEVC. Les porosités ouvertes des mortiers étudiés ont confirmé que leur résistance mécanique est en étroite relation avec leur porosité accessible à l'eau, la porosité ouverte des

MBAPE avec les deux différentes additions minérales est légèrement élevée que celles des MBAPET correspondants.

- Pour les coefficients de sportivités obtenus après 28 jours de cure, l'incorporation de la vase calcinée dans les MBAPE a un effet très bénéfique sur ce paramètre de transfert. Les MBAPEVC ont présenté des coefficients très proches de ceux du MBAPET et nettement inférieurs à ceux des MBAPECV. La comparaison entre les mortiers de référence et les mortiers à base des deux additions minérales a montré que les MBAPET présentent de meilleures performances d'absorption capillaire.

Les différents résultats ainsi obtenus nous permettent de préconiser l'utilisation des sédiments traités du barrage de Chorfa II en substitution partielle du ciment Portland afin de réduire le retrait de dessiccation à long terme et d'améliorer les propriétés de transport. En plus de l'avantage économique, l'incorporation de ce déchet naturel dans les MBAPE présente, en général, des performances très comparables, voire meilleures (comme pour la résistance à la compression), par rapport à l'utilisation des cendres volantes.

Perspectives

Vu les résultats de cette étude, nous pourrions envisager en toute évidence quelques perspectives pour faire suite à ce travail en envisageant d'étudier l'influence de la vase calcinée sur les paramètres physico-mécaniques tels que les modules d'élasticité statique et dynamique, sur le retrait empêché et sur les paramètres de durabilité par des essais de perméabilité au gaz, de coefficient de migration des ions chlorures et de porosité au mercure des mortiers de béton autoplaçant équivalent et d'étudier l'influence de la vase traitée par calcination sur la surface spécifique et la distribution des tailles des pores des pâtes de ciment durcies par sorption d'azote.

Les sédiments dragués peuvent être considérés et utilisés comme nouvelle ressource en matériaux pour la production de ciment mélangé. Pour une utilisation industrielle de ces ciments, une analyse coûts / avantages doivent être effectuées.

En outre, le remplacement d'une partie du ciment par des sédiments peut avoir des impacts environnementaux et économiques importants en raison de la forte énergie et des coûts de production du ciment.

Nous recommandons de développer une nouvelle approche pour la réutilisation de ces sédiments dans une matrice cimentaire reposant sur des traitements physiques et thermiques. Cette approche repose sur quatre paramètres : propriétés des sédiments, température de la calcination, durée de la calcination et la taille des grains. À cette fin, la finesse et le traitement thermique doivent être optimisés.

Enfin, une vraie étude du cycle d'évaluation de la durée de vie des sédiments dragués du barrage de Chorfa II est alors recommandée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] MESBAH H., LARABA A., YAHIA A., «Flowability and Stability Performance of Self-Consolidating Concrete in Full-Scale Beam». 8th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete- SCC2016, May 2016, Washington, DC, United States. Conference Proceedings (665-674), <http://www.scc2016.com>

[2] SEMCHA A., « Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug ». Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2006.

ANNEXES

Notice technique
 Edition octobre 2012
 Numéro 226
 Version n°2012-247
 SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 11

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 11

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

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



Présentation SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

Domaines d'application

- n SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants sur une large gamme de résistance mécanique (du C20 au C60) et transportés sur de longues distances et pompés.
- n SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 rend les formules plus robustes aux variations d'eau et ne présente aucun pétélement sur béton frais.

Caractères généraux SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- n longue rhéologie (>2h),
- n robustesse aux variations d'eau,
- n qualité de parement.



Caractéristiques

Aspect Liquide brun clair

Conditionnement

- n Fûts de 230 kg
- n CP de 1000 L
- n Vrac

Stockage Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

Conservation 12 mois en emballage intact

Données techniques

densité 1,06 ± 0,01



pH	4 à 6
Teneur en Na ₂ O Eq.	≤ 1 %
Extrait sec	28,5 à 31,5%
Teneur en ions Cl ⁻	≤ 0,1 %

Conditions d'application

Dosage Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.
Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,4 % du poids du ciment ou du liant.

Mise en œuvre SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

Précautions d'emploi En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau.
Consulter la fiche de données de sécurité accessible sur Internet www.sika.fr

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



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

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

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