



Faculty of Sciences and Technology

كلية العلوم والتكنولوجيا

Civil Engineering Department

قسم الهندسة المدنية

N° d'ordre : M2... /GC/2024

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Option : Structure

Thème

**Synthèse des Travaux de Recherche Effectués à l'Université de
Mostaganem Sur la Valorisation des Sédiments de Dragage des
Barrages (2010-2019).**

Présenté par :

GHALI Manel

DJAAFER Halima

Soutenu le 26/06/2024 devant le jury composé de :

Mr. MEBROUKI A.

Président

Université de Mostaganem

Mme. BELAS N.

Encadrante

Université de Mostaganem

Mr. BELARIBI O.

Examineur

Université de Mostaganem

Mme. MOSTEFA F.

Invitée.

Université de Mostaganem

DEDICACES

Avant tout je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la foi, le courage et la patience pour continuer mon modeste parcours. Sans oublier mes très chers parents à qui je dois tout : mon père, ma mère qui ont su nous éduquer et donner un sens à notre vie.

A mon cher mari qui ma soutenu tout au long de soutenu tout au long de cette période de stress

A mes chers frères et sœurs qui m'ont soutenu tout le long de mon parcours.

A mon cher professeur, qui m'a encouragé jusqu'à cette minute.

Je remercie les amies d'enfance que j'ai retrouvées dans les moments difficiles dont Sarah et Zainab.

Enfin, j'offre mes bénédictions a tous ceux qui m'ont soutenu dans l'accomplissement de ce travail.

Ghali Manel

REMERCIEMENTS

Au début, on souhaite adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

On tient à remercier tout particulièrement notre encadrant Pr. Madame Belas Nadia pour nous avoir suivis et conseillés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Ce mémoire de n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif des membres de notre famille,

Surtout mon parent qu'ils nous ont toujours encouragé moralement et matériellement et à qui on tient à les remercier.

Je remercie tous ses professeurs pour leur présence dans ces moments de joie : Belaribi. O, Safer. O, Belguesmia. Kh, Taieb. F, Hadj Sadok. R.

Enfin on tient à exprimer vivement nos remerciements avec une profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation, car un projet ne peut pas être le fruit d'une seule personne.

Merci

RESUME

L'Algérie bénéficie d'une pluviométrie très faible c'est pourquoi des programmes de construction de barrages à travers tout le territoire national ont été entrepris. Malheureusement ces réalisations voient leurs capacités de retenue d'eau diminuer d'année en année. Il fallait donc penser à les débarrasser des sédiments qui séjournent au fond du bassin. Le dragage constitue une activité vitale pour l'exploitation des barrages subissant des envasements, mais le devenir des quantités importantes de sédiments récupérés constitue un enjeu environnemental et économique de taille. Les sédiments dragués sont alors déposés aux alentours du barrage défigurant le paysage, détériorant le milieu, occupant de plus en plus d'espace et polluant l'environnement immédiat.

Des études ont été menées, à travers le monde, dans le domaine de caractérisation physicochimique, mécanique et durabilité pour essayer de tirer profit de ces déblais de dragage des barrages.

Ce projet consiste en une synthèse d'une partie de ces études à savoir les recherches réalisées par des doctorants du département de Génie Civil de l'Université de Mostaganem et dirigées par Professeure Nadia BELAS et ce depuis 2010. Elles ont toutes démontré la possibilité d'utiliser ces sédiments, après calcination pour les rendre actifs, en tant que matière première dans le domaine de génie civil, et spécialement en substitution partielle au ciment.

Les matériaux cimentaires à base de ces substitution partielles (pâtes, mortiers, béton ordinaire, béton autoplaçant) permettront de consommer ces déblais de dragage, ainsi qu'une amélioration des caractéristiques liées au comportement mécanique et la durabilité de ces types de matériaux. Par ailleurs ces études sont basées sur le principe du développement durable et la recherche du moindre impact sur l'environnement lié à la gestion des sédiments dragués en proposant des solutions pour l'industrialisation de ces matériaux dans le domaine de la construction.

Mots clés : Synthèse, Envasement, Sédiments, Comportement mécanique, Durabilité, Environnement, Industrialisation.

ABSTRACT

Algeria benefits from very low rainfall, that's why dam construction programs throughout the national territory have been undertaken. Unfortunately, these achievements see their water retention capacities decrease from year to year. It was therefore necessary to think about ridding them of the sediments which remained at the bottom of the basin. Dredging constitutes a vital activity for the operation of dams' subject to siltation, but the fate of the significant quantities of recovered sediments constitutes a major environmental and economic challenge. The dredged sediments are then deposited around the dam, disfiguring the landscape, deteriorating the environment, occupying more and more space and polluting the immediate environment.

Studies have been carried out around the world in the field of physicochemical, mechanical and sustainability characterization to try to take advantage of these dredged sediments from dams.

This project consists of synthesis of part of these studies, namely the research carried out by PhD students from the Department of Civil Engineering of Mostaganem University supervised by Professor Nadia BELAS since 2010. They have all demonstrated the possibility of using these sediments, after calcination to make them active, as a raw material in the field of civil engineering, and especially as a partial replacement for cement. Cementitious materials based on these partial substitutions (pastes, mortars, ordinary concrete, self-compacting concrete) will make it possible to consume these dredged sediments, as well as improve characteristics related to mechanical behaviour and durability of these types of materials. Furthermore, these studies are based on the principle of sustainable development and the search for the least impact on the environment linked to the management of dredged sediments by proposing solutions for the industrialization of these materials in the field of construction.

Keywords: Synthesis – Siltation – Sediments – Mechanical behavior –Durability – Environment - Industrialization.

ملخص

تتميز الجزائر بقلّة هطول الأمطار، ولهذا السبب تم تنفيذ برامج بناء السدود في جميع أنحاء الأراضي الوطنية. ولسوء الحظ، فإن هذه الإنجازات تشهد انخفاضاً في قدرتها على الاحتفاظ بالمياه من سنة إلى أخرى. لذلك كان لا بد من التفكير في تخلصها من الرواسب التي تتجمع في قاع أحواض السدود.

يشكل التجريف نشاطاً حيويًا لتشغيل السدود المعرضة للظمي. لكن مصير الكميات الكبيرة من الرواسب المجرّفة يشكل تحدياً بيئياً واقتصادياً كبيراً. بفعل تراكم الرواسب المجرّفة حول السد، مما يؤدي إلى تشويه المناظر الطبيعية، وتدهور البيئة، واحتلال المساحة المتزايدة لتلويث البيئة مباشرة.

وقد تم إجراء دراسات حول العالم لمعرفة الخصائص الفيزيائية، الكيميائية، الميكانيكية والديمومة لمحاولة الاستفادة من هذه المخلفات المجرّفة من السدود.

يعتبر هذا المشروع حوصلة لجزء من هذه الدراسات، التي تم إجرائها من قبل طلاب دكتوراه من قسم الهندسة المدنية بجامعة مستغانم بإدارته الأستاذة نادية بلاس وهذا منذ عام 2010. وقد اثبتت جميعها إمكانية استخدام هذه الرواسب. بعد تكليسها لجعلها فعالة، كمادة أولية في مجال الهندسة المدنية، وخاصة كبديل جزئي للأسمنت. ان المواد الاسمنتية المعتمدة على هذه البدائل الجزئية (المعاجن، والملاط، والخرسانة العادية، والخرسانة ذاتية الرس) ستجعل من الممكن استهلاك هذه الرواسب المجرّفة، فضلاً عن تحسين الخصائص المتعلقة بالسلوك الميكانيكي والديمومة هذه الأنواع من المواد. علاوة على ذلك، تركزت هذه الدراسات على مبدأ التنمية المستدامة والبحث عن أقل تأثير على البيئة مرتبط بإدارة الرواسب المجرّفة من خلال اقتراح حلول لتصنيع هذه المواد في مجال البناء.

الكلمات المفتاحية: الحوصلة- الظمي- الترسيب - الرواسب - السلوك الميكانيكي - الديمومة - البيئة - التصنيع.

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	I
Remerciements	II
Résumé	III
Abstract	IV
ملخص	V
TABLE DES MATIERES	VI
Liste des figures	VIII
Liste des Tableaux	X
Introduction Générale	01
CHAPITRE I : ENVASEMENT DES BARRAGES EN ALGERIE.	
I.1 Introduction	04
I.2 Généralités sur les sédiments	04
1.2.1 Définition	04
1.2.2 Constitution et composition minérale des sédiments	05
1.2.3 Granulométrie des sédiments	07
I.3 Evolution de l'envasement des barrages en ALGERIE	08
I.3.1 Etat d'envasement en ALGERIE	08
1.3.2 Phénomène de l'envasement	12
1.3.3 L'envasement en quelques Chiffres	13
1.3.4 Problèmes dus a l'envasement des barrages	14
1.3.4.1 <i>La réduction de la capacité</i>	15
1.3.4.2 <i>L'obturation des organes de vidange</i>	17
1.3.4.3 <i>La sécurité de l'ouvrage</i>	17
1.3.4.4 <i>L'envasement des canaux d'irrigation</i>	17
1.3.4.5 <i>Dégradation de la qualité de l'eau</i>	17
1.3.5 Processus de l'envasement	18
1.3.6 Moyens de lutte contre l'envasement	19
I.4. Présentation du barrage de Fergoug	20
I.4.1. Situation et caractéristiques géologiques du site	20
I.4.2. Le bassin versant du barrage de Fergoug	20
I.4.3. Situation actuelle du barrage	21
I.5. PRESENTATION DU BARRAGE DE CHORFA	22
I.6. Conclusion	24
CHAPITRE II : RESUME DE LA RECHERCHE DE BELARIBI O. [17]	
II.1 Introduction	26
II.2 Programme expérimental	26
II.2.1 Préparation de la vase	26
II.2.2 Les formulations étudiées	27
II.3 Résultats de la recherche	29
II.3.1 Etude a l'état frais	29
II.3.2 Résistances mécaniques en compression	30
II.3.3 Durabilité	31
II.4 Conclusion	34
CHAPITRE III : RESUME DE LA RECHERCHE DE SAFER O. [19]	
III.1 Introduction	35
III.2 Les formulations étudiées	35
III.3. Résultats de la recherche	36
III.3.1 Etude a l'état frais	36
III.3.2 Evolution des résistances mécaniques en compression	37

III.3.3 Durabilité	39
<i>III.3.3.1 Attaque par le sulfate de magnésium (MgSO₄)</i>	39
<i>III.3.3.2 Attaque de l'eau de mer</i>	40
<i>III.3.3.3 Attaque par l'acide H₂SO₄</i>	40
<i>III.3.3.4 La carbonatation naturelle</i>	41
<i>III.3.3.5 L'absorption capillaire (la sportivité) et la porosité accessible a l'eau</i>	42
III.3 Conclusion	44
<hr/> CHAPITRE IV : RESUME DE LA RECHERCHE DE BELGUESMIA KH. [23] <hr/>	
IV.1 Introduction	45
IV.2 Les formulations étudiées	45
IV.3 Résultats de la recherche	46
IV.3.1 Etude a l'état frais	46
IV.3.2 Résistances a la compression	47
IV.3.3 Le retrait	48
IV.3.4 Durabilité	49
IV.5 Conclusion	52
<hr/> CHAPITRE V : RESUME DE LA RECHERCHE DE TAIEB F. [27] <hr/>	
V.1 Introduction	53
V.2 Les formulations étudiées	53
V.3 Résultats de la recherche	54
V.3.1 Etude a l'état frais	54
V.3.2 Résistances mécaniques en compression	55
V.3.3. Effet des additions minérales sur le retrait total et la perte de masse	57
V.3.4 Indicateurs de la durabilité	58
<i>V.3.4.1 Porosité accessible a l'eau</i>	58
<i>V.3.4.2 L'absorption capillaire</i>	59
IV.4. Initiation et développement de fissures par l'essai de retrait empêché	60
V.4 Conclusion	62
<hr/> CHAPITRES VI : RESUME DE LA RECHERCHE DE HADJ SADOK R. [38] <hr/>	
VI.1 Introduction	63
VI.2 Programme expérimental	63
VI.2.1 Les formulations étudiées	64
VI.3 Résultats de la recherche	64
VI.3.1 L'état frais	64
VI.3.2 L'état durci	65
VI.4 Analyse du cycle de vie (ACV)	66
VI.4.1 L'ACV des sédiments de dragage calcines	66
VI.4.2 Analyse du cycle de vie des ciments a base de sédiments calcines	68
VI.4.3 Analyse du cycle de vie des pates et mortiers a base des sédiments calcines	69
VI.5 Conclusion	71
Conclusion générale	72
Références bibliographiques	74

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Origine des sédiments dans l'environnement aquatique (MAES E).	05
Figure I. 2 : Diagramme triangulaire utilise pour les sols fins (BONNET C, 2006).	08
Figure I. 3 : Les barrages en ALGERIE (GEOPORTAIL, 2018).	13
Figure I. 4 : Pourcentage d'envasement par rapport à la capacité totale des barrages Algériens (ANBT, 2015).	14
Figure 1. 5 : Le classement des 10 plus grands barrages les plus envases en Algérie (ANBT, 2015).	14
Figure 1. 6 : Situation géographique du barrage de Bouhanifia (GOOGLE MAPS, 2019).	15
Figure 1.7 : Situation géographique du barrage de K'sob (GOOGLE EARTH, 2019).	16
Figure I.8 : Type de charriage (REMINI, 1996).	18
Figure I.9 : Organigramme du processus d'envasement d'une retenue (REMINI, 1996)	19
Figure I.10 : Situation géographique du barrage de fergoug [101].	20
Figure I.11 : le barrage du fergoug, ses ouvrages annexes et ses affluents [102].	21
Figure I.12 : Vue du barrage de Fergoug (2012).	21
Figure I.13 : La digue et la cuvette envasée du barrage de Fergoug (2012).	22
Figure 1.14 : Situation géographique de la ville de mascara et du barrage de chorfa.	23
Figure I.15 : Vue générale du barrage de Chorfa.	23
Figure I.17 : Vue de la cote interne de la digue du barrage Chorfa.	24
Figure II.1 : Les étapes de préparation de la vase.	27
Figure II.2 : Evolution des résistances mécaniques des BAP en fonction du temps.	31
Figure II.3: Variation de la masse des échantillons immerges dans la solution de 5% de sulfate de sodium	31
Figure II.4: Variation de la masse des échantillons immerges dans la solution de 5% $MGSO_4$.	32
Figure II.5 Perte de masse des bétons âges de 90j et immerges dans la solution 5% H_2SO_4	32
Figure II.6 : Variation de la perte en poids des BAP en fonction du période d'immersion en 5% HCL.	33
Figure II.7 : Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée des bétons.	33
Figure III.1 : Affaissements des bétons confectionnes.	36
Figure III.2 : Résistances à la compression des bétons en Mpa en fonction du temps.	37
Figure III.3 : Evolution de la résistance des bétons a base de vase par rapport au béton témoin	38
Figure III.6: Variation de la masse des échantillons immerges dans la solution de 5% $MGSO_4$	39
Figure III.8: Variation de la masse des échantillons immerges dans la solution de l'eau de mer	40
Figure III.10 : Perte de masse des bétons âges de 90j et immerges dans la solution H_2SO_4	41
Figure III.11: Profondeur de carbonatation naturelle des bétons d'études, après 12 mois a l'air libre de laboratoire	42
Figure III.12 : Coefficients de sportivité des différents bétons d'étude, essai réalise après 28 jours de conservation.	43
Figure III.13 : Porosité accessible a l'eau des bétons.	43
Figure IV.1 : Courbes d'évolution des résistances à la compression des BAP.	48
Figure IV.2: Retrait total des quatre BAP en fonction du temps.	49
Figure IV.3 : Porosité accessible a l'eau des quatre BAP en fonction du temps.	50
Figure.4 : Volume cumule des pores des quatre BAP	51

Figure IV.5 : Distribution porale des quatre BAP.	51
Figure V.1. Evolution des résistances a la compression en fonction du temps	56
Figure V.2. Evolution de retrait total des MBAPE avec les deux rapports E/L	57
Figure V.3. Evolution de la perte de masse totale des MBAPE en fonction de temps avec les deux rapports E/L	58
Figure V.4. Porosité accessible a l'eau des différents mortiers d'étude, essai réalise après 28 jours de cure.	59
Figure V.5. Coefficients de sportivité des différents mortiers d'étude, essai réalise après 28 jours de conservation.	60
Figure V.6. Mesure des largeurs des fissures par le capteur de fissure.	61
Figure.1 : Influence des dosages des sédiments calcines sur le temps de prise.	64
Figure VI.2 : Evolution de la résistance en compression des mortiers a base de sédiments de dragage par rapport au mortier témoin A 10°C, 20°C et 40°C.	66
Figure 3. 1 : cycle de vie des sédiments de dragage : cas d'application dans le bâtiment avec un béton et mortier, ou une partie du ciment sera substituée par des sédiments de dragage.	67
Figure VI.4 : Processus de traitement des sédiments de dragage calcines scenario envisage N°1.	68
Figure VI.5 : le processus de traitement des sédiments de dragage calcines du scenario N°2.	68
Figure VI.6 : Comparaison des scores de dommages d'impacts d'une tonne de ciments a base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcines.	69
Figure 3. 2 : Comparaison des scores de dommages d'impacts des pates a base de 0%, 5%, 15% et 25% sédiments calcines.	70
Figure VI.7 : Comparaison des scores de dommages d'impacts des mortiers a base de 0%, 5%, 15% ET 25% sédiments calcines.	70

LISTE Des Tableaux

Tableau I.1 : Classement granulométrique des sédiments (SHNEIDER G, 2001)	07
Tableau I. 2 : Capacité des barrages ALGERIENS ANBT (ANBT, 2015).	09
Tableau I. 3 : Envasement moyen annuel des barrages ALGERIENS ANBT (ANBT, 2015)	11
Tableau I.4 : Le barrage en chiffres (ANBT, 2015).	16
Tableau I. 5 : Le barrage en chiffres (ANBT, 2015).	17
Tableau II.1 : Compositions des BAP	27
Tableau II.2: Caractéristiques des BAP confectionnées	28
Tableau II.3 : Les résultats des essais de caractérisation à l'état frais	29
Tableau III.1: Composition des bétons d'étude	35
Tableau III.2: Caractéristiques des bétons d'étude	36
Tableau III.3 : Taux d'adjuvant en fonction du liant.	37
Tableau IV.1 : Compositions des quatre BAP.	45
Tableau IV.2 : Caractéristiques générales des quatre BAP.	46
Tableau IV.3 : Récapitulatif des résultats de caractérisation a l'état frais.	47
Tableau V.1 Compositions des MBAPE	54
Tableau V.2. Récapitulatif des résultats d'étalement des MBAPE étudiées	54
Tableau V. 3. Récapitulatif des résultats de temps de prise des MBAPE étudiées	55
Tableau VI.1 : Formulations des différents mortiers.	64

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les retenues du barrage sont soumises à une forte sédimentation en raison des volumes considérables d'apports solides transportés chaque année par les rivières surtout lors des fortes crues. Afin de prolonger la « durée de vie » des barrages, le dragage de la retenue est devenu une solution indispensable malgré les énormes quantités de vases extraites par les vannes de fond du barrage et qui ne trouvent aucune application et leur stockage pose actuellement un problème qui menace l'environnement.

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

Le parallélisme entre l'accroissement de la nécessité de dévasement et l'intérêt que porte la recherche dans les matériaux de construction met en évidence l'idée de la valorisation des vases draguées après traitement dans la composition des matériaux cimentaires, ce qui semble être une voie prometteuse.

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

La caractérisation physico-chimique et minéralogique de la fraction solide des vases extraites des barrages de Chorfa ou de Fergoug (ouest algérien) a donné plus de crédibilité à cette voie de valorisation en tant que matière première dans le secteur du génie civil.

C'est pourquoi, cette étude a été engagée dans un but écologique, économique et technique en ciblant les résultats de recherches effectuées à l'Université de Mostaganem sur les sédiments de dragage des barrages valorisés comme étant des matériaux de construction à part entière substituables en partie au ciment entrant dans la composition des mortiers et bétons.

Ce travail se présentera comme suit :

Le premier chapitre est consacré à l'étude du problème de la sédimentation dans les barrages et plus particulièrement les barrages algériens. Il décrit les sédiments et leur processus de décantation. Il présente les deux barrages concernés par les recherches synthétisées à savoir le barrage de Fergoug et celui de Chorfa II.

Le deuxième chapitre résume la recherche menée par Belaribi Omar concernant la valorisation de la vase traitée thermiquement, issue des sédiments de dragage des barrages de Chorfa et Fergoug, comme étant un matériau de construction à part entière substituable en partie au ciment entrant dans la composition des BAP pour lequel le comportement physico-mécanique et de durabilité (attaques des sulfates, des acides et du CO₂) a été suivi.

Le troisième chapitre décrit la recherche de Safer Omar qui est consacrée à approfondir les études entamées sur la vase issue des sédiments de dragage des barrages en valorisant celle du barrage de Chorfa et donc encourager son utilisation à des fins d'exploitation comme matériau noble entrant dans la composition du béton ordinaire répondant à des normes acceptables. Il a été question de mettre en évidence l'effet de l'incorporation de la vase sur le développement des résistances mécaniques et durabilité de ces bétons (attaques des acides, des sulfates, du CO₂ et de l'eau de mer) ainsi que les propriétés de transfert telles que l'absorption capillaire et la porosité accessible à l'eau.

Les travaux de Belguesmia Khalil ont fait l'objet du **quatrième chapitre** qui avait pour objectif d'enrichir et approfondir les recherches entamées sur la vase extraite de barrage Chorfa en la caractérisation vis-à-vis de la pouzzolanité en vue d'optimiser les pourcentages de sa substitution partielle au ciment dans la formulation de béton autoplaçant à performances répondant aux normes en vigueur. Il présente un résumé des résultats qui touchent la caractérisation des BAP à l'état frais et à l'état durci et par rapport aux indicateurs de durabilité en l'occurrence les porosités à l'eau et au mercure.

Le Cinquième chapitre synthétise les résultats issus de la recherche de Taieb Fatima sur les mortiers de béton autoplaçant équivalent (MBAPE) à base de vase calcinée répondant aux normes en vigueur en évaluant leurs comportements différés envers le retrait et leur durabilité. Le but est d'encourager son utilisation à des fins d'exploitation comme matériau de construction à part entière.

Quant au **sixième chapitre**, il présente l'étude de Hadjsadok Rachid portant sur le domaine de la valorisation des sédiments de dragage appuyée par une évaluation environnementale par l'analyse du cycle de vie (ACV) des sédiments de dragage en proposant un procédé d'industrialisation pour faire face au problème d'envasement des barrages, permettant l'élaboration d'une vase calcinée issue de ces sédiments, la moins impactante sur l'environnement du point de vue consommation d'énergie et dégagement de gaz à effet de serre.

Cette synthèse est clôturée par une conclusion générale comprenant un bilan final.

CHAPITRE I : ENVASEMENT DES BARRAGES EN ALGERIE

I.1 INTRODUCTION

La sédimentation dans les barrages est un phénomène naturel. Les sédiments ont les uns une origine endogène provenant de la production du milieu local ; les autres une origine exogène issue d'un apport de matières de l'érosion des sols ; et du ruissellement. Ces particules se déposent au fond du bassin du barrage où se produit la sédimentation à travers le temps. Une étude de leurs caractères s'impose : classement granulométrique ; caractéristiques ; composition minérale ; teneur en eau et en matière organique.

En même temps l'eau devient de plus en plus rare. Pour cela elle doit être davantage maîtrisée à travers tout le territoire national. Malheureusement le phénomène de l'érosion hydraulique met en danger ces potentialités. L'Algérie a investi des moyens colossaux pour alimenter en eau potable sa population et permettre l'irrigation des terres agricoles. De grands efforts ont été déployés pour assurer l'autosuffisance en eau potable et fournir l'eau aux industriels. Des réalisations de barrages à travers tout le territoire national ; de toutes dimensions, ont vu et vont pouvoir voir le jour. Des efforts sont faits à travers le monde pour valoriser les sédiments issus du dragage des barrages. Il s'agit d'un problème mondial. Cela nous amène à réfléchir pour sauver les différentes réalisations.

I.2 GENERALITES SUR LES SEDIMENTS

1.2.1 Définition

Les sédiments sont des particules minérales ou organiques déposées par l'eau, le vent ou la glace, qui proviennent de l'usure des continents, c'est-à-dire de la destruction de roches ou d'êtres vivants [1]. La destruction se fait par des mécanismes physiques produisant la fragmentation des matériaux et des réactions chimiques donnant des solutions de lessivage. Parmi les particules minérales on peut citer les produits de l'érosion des berges et du lit lors du ruissellement après les fortes pluies, les poussières atmosphériques, les rejets industriels. Les matières organiques peuvent provenir de la biomasse, des déblais d'origines d'animaux

ou de végétaux, des eaux usées domestiques, des élevages(bétail), du trafic routier et des traversées du lit par les engins forestiers (voir Figure I.1).

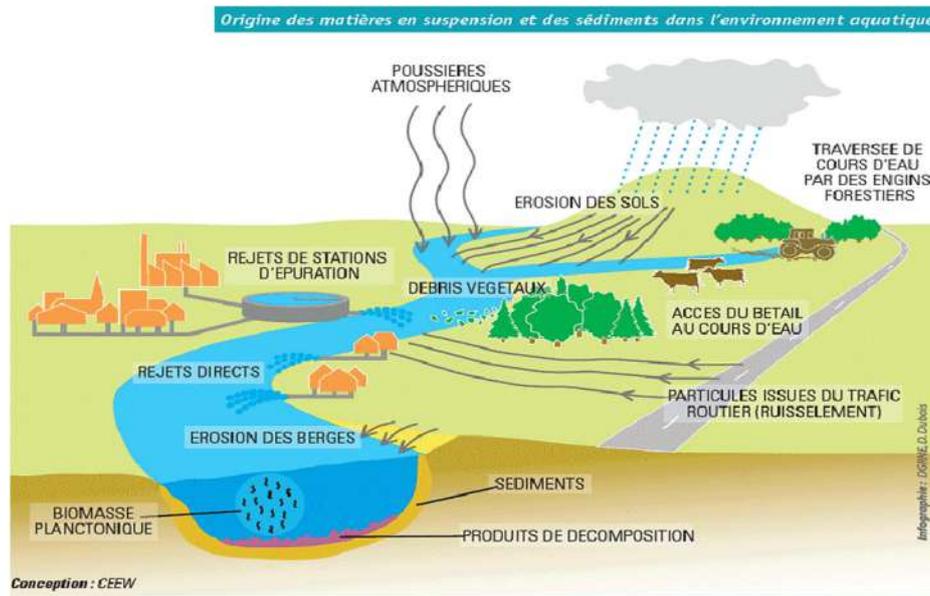


Figure I.1 : Origine des sédiments dans l’environnement aquatique [2]

On distingue deux origines des sédiments.

- Origine endogène : les particules proviennent de la production autochtone de milieu. Il s’agit de débris de macrophytes comme les plantes aquatiques, les cadavres de microphytes et d’animaux [3].
- Origine exogène : il s’agit des particules qui sont issues du ruissellement des eaux ou bien transportées par les vents. D’origines naturelles ou anthropiques, elles proviennent de l’érosion des sols, de la décomposition de matière végétale, de l’apport de matière en suspension, matière organique, de nutriment ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques [4]. Plusieurs aspects permettent de décrire un sédiment : sa constitution et composition minéralogique, sa granulométrie, ses teneurs en eau et en matière organique. Les sédiments fluviaux des zones d’eau calmes contiennent en majorité les éléments fins (vases, limons et sables) [3].

1.2.2 Constitution et composition minérale des sédiments

Un sédiment se caractérise essentiellement par 4 éléments principaux [5] :

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

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

Les argiles sont des silicates d'aluminium hydratés qui présentent une structure cristalline en feuillets, d'où leur nom de phyllites. Ils appartiennent, comme les micas, au groupe des phyllosilicates. Chaque cristal ou phyllite, dont l'épaisseur se mesure en micromètres, est composé de quelques centaines de feuillets empilés, qui se mesurent en nanomètres. Chaque feuillet est composé de deux, trois ou quatre couches planes associées. De ses variations viennent les différentes espèces de minéraux argileux, parmi elles [6] :

Les illites

Ce minéral est le plus répandu des minéraux argileux dans les sédiments et les sols. Il est construit sur le modèle du mica blanc, mais avec une structure plus désordonnée et moins de potassium dans les espaces inter foliaires. Il est très fréquent dans une foule de roches détritiques comme matrice ou comme ciment [7].

Les montmorillonites

Les montmorillonites peuvent être détritiques, par héritage des sols ou des sédiments plus anciens qui les contiennent. Elles peuvent être néoformées en milieu alcalin à partir des autres silicates ou à partir des verres volcaniques. Elles ont une foule d'applications économiques dans les industries chimiques, les boues de forage, etc [7].

Le kaolin

D'origine chinoise « Kaoliang », La kaolinite se forme comme produit résiduel météorologique ou comme minerai sédimentaire, dans les sols. Elle est formée dans les conditions de pression et de température de la surface de la terre (25–30°C et de pression atmosphérique).

Enfin, la nature de l'eau contenue dans les vases, appelée « eau interstitielle » afin de la différencier de la colonne d'eau qui se trouve au-dessus, peut être répartie en 4 catégories [8] :

- a) L'eau libre qui n'est pas liée aux fines
- b) L'eau capillaire, liée aux fines par des forces de capillarité
- c) L'eau colloïdale qui hydrate les colloïdes

d) L'eau adsorbée qui est liée à la surface des particules et constitue un film autour d'elles.

1.2.3 Granulométrie des sédiments

La répartition des sédiments dans un milieu aquatique se fait en fonction de la taille des particules. Les particules de dimensions importantes restent plutôt en amont alors que celles de plus faibles dimensions se retrouveront en aval. Selon [3] les sédiments de dragage peuvent comporter plusieurs classes granulométriques couramment utilisées. Elles sont présentées dans le tableau I.1 :

Tableau I.1 : Classement granulométrique des sédiments [1]

Taille	Dénomination
> 20 cm	Blocs
2 cm à 20 cm	Galets et cailloux
2 mm à 2 cm	Gravier
20 µm à 20 mm	Sables (grossiers et fins)
2µm à 20 µm	Limons (silt)
< 2 µm	Vase, 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. La proportion de sables, limons et argiles d'un L'identification des sédiments est utile servant de procéder à leur valorisation La caractérisation physico-chimique et minéralogique permet de définir l'aspect physique et les principaux minéraux présents. Le premier traitement avant l'étude pourrait être le séchage naturel dans un bassin de décantation. On sépare ensuite les particules les plus fines des plus grosses. La détermination de la granulométrie est réalisée à l'aide de deux méthodes : la granulométrie laser et la sédimentation par densimètre associée au tamisage. On établit une classification triangulaire des sédiments % argile (<2µm) - % sable (>63µm) -% silts (sable très fin). Le sédiment peut être classé comme matériau limoneux, ou comme catégorie du limon silteux selon le diagramme triangulaire des classifications des sols de la figure I.2.

Globalement on peut dire que les sédiments se composent d'une importante fraction silteuse d'environ 60 % et d'au moins 12% d'éléments inférieurs à 2 μ m.

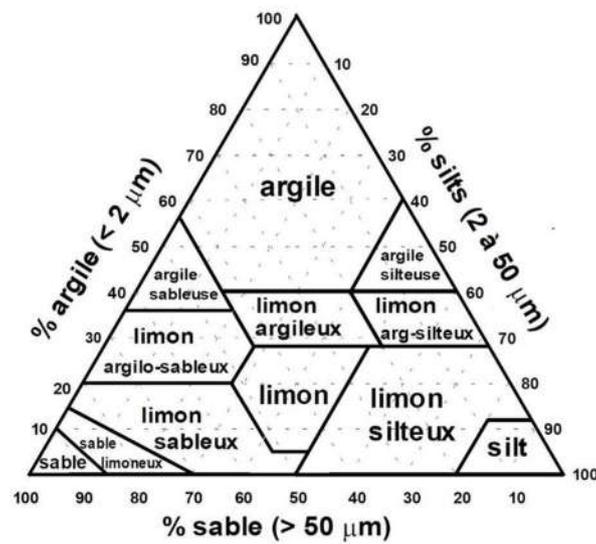


Figure I. 2 : Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins [9].

I.3 EVOLUTION DE L'ENVAISEMENT DES BARRAGES EN ALGERIE

I.3.1 Etat d'envasement en Algérie

Dans le tableau I.2, sont données les capacités des barrages Algériens selon l'ANBT ; l'Agence Nationale des Barrages et Transferts [10].

Tableau I. 2 : Capacité des barrages Algériens ANBT [10].

	Barrage	Wilaya	Année de mise à l'eau	Capacité Initiale Hm³
1	AIN ZADA	BBA	1985	125
2	KOUDIAT MEDOUAR	BATNA	2001	69,1
3	HEMMAM DEBAGH	GUELMA	1987	220
4	GUENITRA	SIKIKDA	1984	125
5	ZIT EMBA	SIKIKDA	2002	120
6	BENI ZID	SIKIKDA	2000	40
7	ZARDEZAS	SIKIKDA	1945-1974	31
8	KSOB	MSILA	1940-1976	29,5
9	BENI HAROUN	MILA	2003	960
10	HEMMAM GROUZ	MILA	1987	45
11	CHEFFIA	EL TAREF	1965	171,96
12	MEXA	EL TAREF	1998	47
13	OUED CHAREF	SOUK AHRAS	1995	157
14	AIN DALIA	SOUK AHRAS	1988	82
15	AL AGRAM	JIJEL	2002	33,9
16	FOUM EL GHORZA	BISKRA	1950	47
17	FONTAINE DES GAZELLES	BISKRA	2000	55,5
18	BABAR	KHANCHELA	1995	41
19	FOUM EL GUEISS	KHANCHELA	1938-1969-2005	3
20	OUED ATHMANIA	MILA		33,25
21	KISSIR	JIJEL		68
22	BOUSSIABA	JIJEL		120
23	BOUGOUS	EL TAREF		66
24	BENI-AMRANE	BOUMERDES	1988-2003	16
25	BOUKOURDANE	TIPAZA	1992	97
26	BOUROUMI	AIN DEFLA	1985	188
27	HAMIZ	BOUMERDES	1897-1935	21

28	KEDDARA	BOUMERDES	1986	145,6
29	LADRAT	MEDEA	1990	10
30	LEKHAL	BOUIRA	1985	30
31	MEURAD	TIPAZA	1861	0,9
32	NADOR	TIPAZA	2003	Prise
33	TAKSEBT	TIZI-OUZOU	2001	175
34	TICHY HAF	BEJAIA	2007	80
35	TILES DIT	BOUIRA	2004	165,55
36	K-ACCERDOUNE	BOUIRA		640
37	CHIFFA	MEDEA		Transfert
38	HARBIL	MEDEA	1988	Transfert
39	BAKHADDA	TIARET	1936-1959	56
40	BOUGHZOUL	MEDEA	1934	55
41	COLONNEL BOUGARA	TISSEMSILT	1989	13

Le tableau montre que l'Algérie dispose actuellement de 72 barrages. La rareté des ressources en eau est importante. La quantité d'eau distribuée par an à la population est de 3,6 milliards de m³. Elle est puisée à hauteur de 51% des forages, de 35% des barrages et de 14% des stations de dessalement. La place occupée par les barrages est importante. Les transports des sédiments dans le réseau hydrographique et leur dépôt dans les retenues posent des problèmes d'exploitation. La capacité se réduit progressivement au fur et à mesure que les sédiments se déposent. De plus l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, L'environnement immédiat subit souvent des dommages considérables. Dans le tableau I.3, sont donnés les taux d'envasement moyen annuel des barrages Algériens ANBT [10].

Tableau I. 3 : Envasement moyen annuel des barrages Algériens ANBT [8]

	Barrage	Wilaya	Année de mise à l'eau	Cap Init	Levé 2014 Hm ³	Taux Envas Hm ³ /an	(%) Envasement
1	AIN ZADA	BBA	1985	125	121,4	0,5	2,88
2	KOUDIAT MEDOUAR	BATNA	2001	69,1	74,32	0,023	-7,55
3	HEMMAM DEBAGH	GUELMA	1987	220	184,35	0,53	16,20
4	GUENITRA	SKIKDA	1984	125	117,82	0,13	5,74
5	ZIT EMBA	SKIKDA	2002	120	116,59	0,24	2,84
6	BENI ZID	SKIKDA	2000	40	39,39	0,52	1,53
7	ZARDEZAS	SKIKDA	1945-1974	31	16,86	0,4	45,61
8	KSOB	MSILA	1940-1976	29,5	11,83	0,7	59,90
9	BENI HAROUN	MILA	2003	960	880	6	8,33
10	HEMMAM GROUZ	MILA	1987	45	40,15	0,4	10,78
11	CHEFFIA	EL TAREF	1965	171,96	158,83	0,17	7,64
12	MEXA	EL TAREF	1998	47	30,27	0,11	35,60
13	OUED CHAREF	SOUK AHRAS	1995	157	152,65	0,52	2,77
14	AIN DALIA	SOUK AHRAS	1988	82	76,08	0,75	7,22
15	AL AGRAM	JIJEL	2002	33,9	33,04	0,1	2,54
16	FOUM EL GHORZA	BISKRA	1950	47	12,9	0,8	72,55
17	FONTAINE DES GAZELLES	BISKRA	2000	55,5	54,74	0,3	1,37
18	BABAR	KHANCHELA	1995	41	38,01	0,68	7,29
19	FOUM EL GUEISS	KHANCHELA	1938-1969-2005	3	1,6	0,43	46,67
20	OUED ATHMANIA	MILA		33,25	31,7		4,66
21	KISSIR	JIJEL		68	59,92		11,88
22	BOUSSIABA	JIJEL		120	109,37		8,86
23	BOUGOUS	EL TAREF		66	60,55		8,26
24	BENI-AMRANE	BOUMERDES	1988-2003	16	11,85	4,1	25,94
25	BOUKOURDANE	TIPAZA	1992	97	105	0,21	-8,25
26	BOUROUMI	AIN DEFLA	1985	188	181,86	0,8	3,27
27	HAMIZ	BOUMERDES	1897-1935	21	15,53	0,35	26,05
28	KEDDARA	BOUMERDES	1986	145,6	142,39	0,05	2,20
29	LADRAT	MEDEA	1990	10	8,47	0,02	15,30
30	LEKHAL	BOUIRA	1985	30	27,16	0,17	9,47
31	MEURAD	TIPAZA	1861	0,9	0,2	0,005	77,78
32	NADOR	TIPAZA	2003	Prise		6	
33	TAKSEBT	TIZI-OUZOU	2001	175	181,02	0,27	-3,44
34	TICHY HAF	BEJAIA	2007	80	77,26	4,7	3,42
35	TILES DIT	BOUIRA	2004	165,55	165,55	0,69	0,00

36	K- ACCERDOUNE	BOUIRA		640	618,54		3,35
37	CHIFFA	MEDEA		Transfert			
38	HARBIL	MEDEA	1988	Transfert			
39	BAKHADDA	TIARET	1936-1959	56	39,94	0,27	28,68
40	BOUGHZOUL	MEDEA	1934	55	20,27	0,66	63,15
41	COLONNEL BOUGARA	TISSEMSILT	1989	13	11,32	0,3	12,92
42	DAHMOUNI	TIARET	1987	41	39,52	0,4	3,61
43	DEURDEUR	AIN-DEFLA	1984	115	105,12	0,83	8,59
44	GHRIB	AIN DEFLA	1939	280	116,32	3,2	58,46
45	HARREZA	AIN DEFLA	1984	70	76,65	0,28	-9,50
46	KOUDIAT ROSFA	TISSEMSILT	2004	73	66,04	1,15	9,53
47	OUED FODDA	CHLEF	1932	228	102,85	2,66	54,89
48	OULED MELLOUK	AIN DEFLA	2004	127	119,4	1,4	5,98
49	SIDI M'HAMED BEN TAIBA	AIN DEFLA	2005	75	70,22	0,4	6,37
50	SIDI YAKOUB	CHLEF	1985	280	252,85	0,17	9,70

Le tableau montre la forte variation de l'envasement en 2015 d'un barrage à l'autre. Avec un climat alternant années sèches et années humides et des pluies d'automne intenses destructives pour les sols, de l'ordre de $100t/Km^2/an$. Une importante quantité de matériaux solides est transportée par les cours d'eau jusqu'aux réservoirs des barrages, menacés par le phénomène de l'envasement (de l'ordre de 0,5% par an) ; Réduisant les disponibilités en eau potable et l'eau pour l'irrigation.

1.3.2 Phénomène de l'envasement

Le taux de sédimentation est un problème alarmant, Il touche particulièrement les pays du Maghreb. Il ne cesse de s'aggraver au fur et à mesure du temps, à cause de la forte érosion du bassin versant pendant les périodes de crues et lors des grands lâchers. L'Algérie dispose de 72 grands barrages, repartis selon la Figure I.3, d'une capacité totale de 7692,24 millions m^3 selon les dernières mesures en 2014. Leur envasement est d'environ 1085,94 millions m^3 . Cela représente un pourcentage d'envasement de 14,12 % de la capacité totale [10].

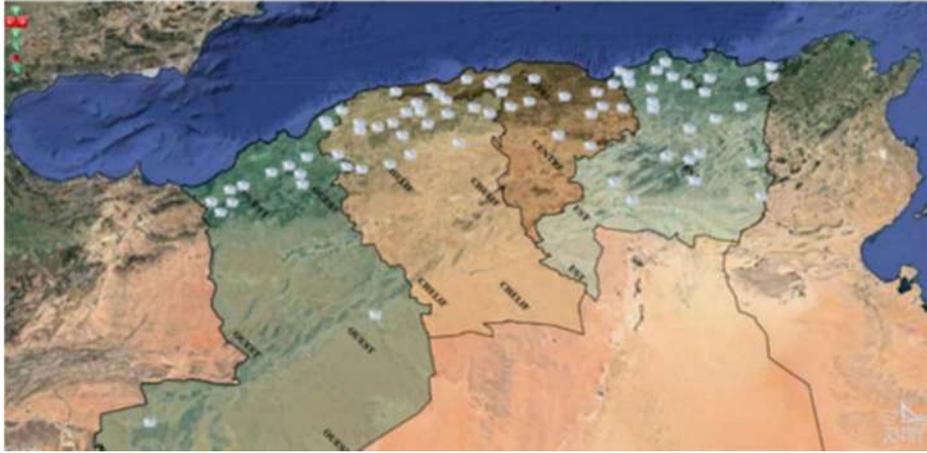


Figure I. 3 : Les barrages en Algérie [11].

Cet envasement, selon des estimations prévisionnelles, atteindrait en 2020 un volume de 1 323,52 millions de m³ pour les seuls barrages existants, soit 17 % de la capacité globale d'emménagement. Cela représente une réduction de capacité de 0,65%/an. Les mesures de l'évaporation, effectuées sur 39 grands barrages, indiquent une perte annuelle moyenne de 250 millions de m³, soit 6,5% de leur capacité maximale. Les pertes par infiltration incontrôlée dans les rives et fondations évaluées pour 22 barrages s'élèvent à 40 millions de m³/an [10]. De grandes opérations de dragage essaient d'éliminer une partie des sédiments dès leur arrivée dans les réservoirs des barrages La troisième dévasement est en cours depuis 2015 Trois grandes opérations de dragage des barrages de Bouhanifia et Foum El Gherza et K'sob sont en cours. Elles visent à récupérer 21,3 millions m³ de capacité de stockage dans un délai moyen de 30 mois [10]

1.3.3 L'envasement en quelques chiffres

La figure I.4 montre La quantité de sédiments déposée en 2014 est de 1085,94 Millions m³ soit un pourcentage d'envasement de 14,12 % de la capacité totale de 7692,24 Millions m³.

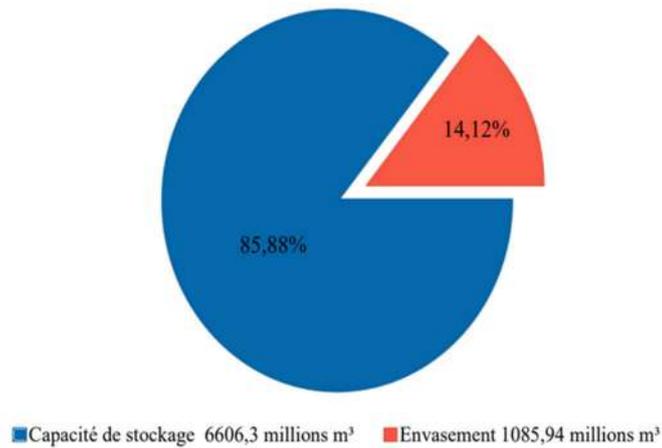


Figure I. 4 : Pourcentage d’envasement par rapport à la capacité totale des barrages Algériens [10].

La figure I.5 montre la forte variation de l’envasement d’un barrage à l’autre, le barrage qui a un pourcentage d’envasement élevé est celui de Fergoug, wilaya de Mascara suivi par Meurad wilaya de Tipaza ; Foug El Ghorza wilaya de Biskara etc....

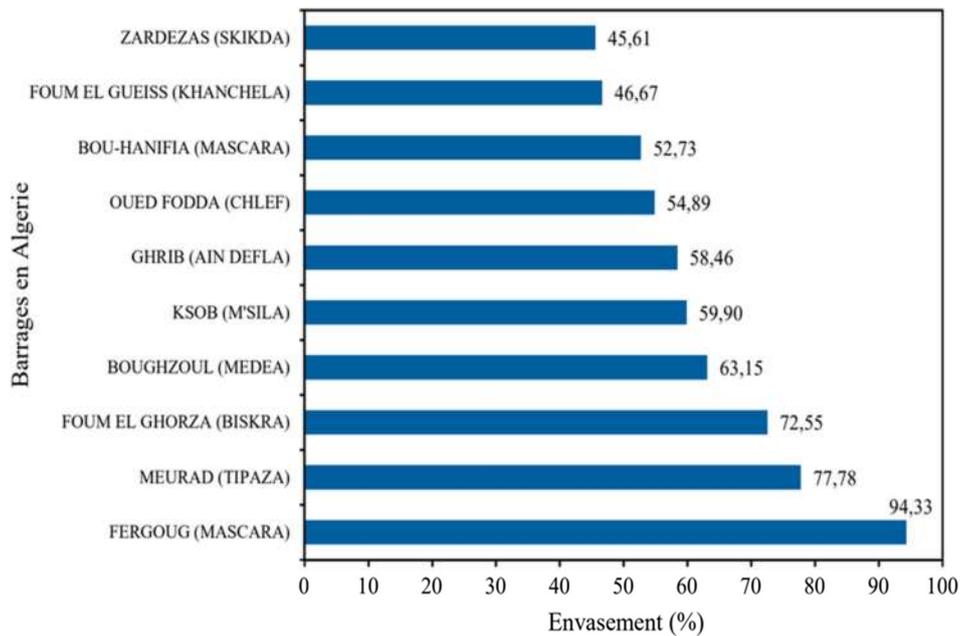


Figure 1. 5 : Le classement des 10 plus grands barrages les plus envasés en Algérie [10].

1.3.4 Problèmes dus à l’envasement des barrages

L’envasement des retenues des barrages pose de multiples problèmes.

1.3.4.1 La réduction de la capacité

Chaque année le fond vaseux évolue et se consolide occupant un volume considérable de la retenue. La quantité de sédiments déposée augmente rapidement et certains barrages risquent de ne plus garantir les quantités d'eau potable et d'irrigation nécessaires. L'évolution dans le temps de la capacité utile des retenues des barrages de Bouhanifia (wilaya de Mascara) et de Ksob (wilaya de M'sila) sont un exemple.

Le barrage de Bouhanifia

Il est situé en amont du barrage de Fergoug. En 1934, débutèrent les travaux de sa construction et la mise en eau ont eu lieu en 1940. Elle visait à régulariser les écoulements de l'oued Hammam vers la retenue de Fergoug, à l'énorme capacité de 18 Millions m³ à la cote de 100,5m. La superficie du bassin versant de l'oued Hābra est de 7850 Km² au niveau du barrage de Bouhanifia, à une altitude de 820 m (Figure I.6, Tableau I.4)



Figure 1. 6 : Situation géographique du barrage de Bouhanifia

Les apports liquides s'élèvent à 138×10^6 m³. Les apports solides des écoulements de l'oued elHammam ont nécessité en 1950 un dragage partiel du réservoir d'une quantité de 6×10^6 m³ de vase. Les apports solides dus à des précipitations violentes sont actuellement de l'ordre de $0,38 \times 10^6$ m³. Depuis sa mise en service en 1940, le barrage de Bouhanifia joue le rôle de Filtre en retenant les particules grossières et ne laissant passer que les sédiments fins vers la retenue de Fergoug.

Tableau I.4 : Le barrage en chiffres [10].

Année de construction	1934
Année de Mise en eau	1940
Année de surélévation	1972 - 1976
Capacité	29,50 hm ³
Capacité dernier levé (2004)	12,34hm ³
Apport moyen annuel	51,50 hm ³
Envasement annuel	0,70 hm ³ /an
Surface du bassin versant	1 460 km ²
Hauteur	46,00 m
Longueur	280,00 m
Côte retenue Normale (R.N)	604,00 mNGA
Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E)	605,50 mNGA
Déversoir à SEUIL LIBRE	850,0 m ³ /s
Vidange de Fond	2 x 65,0 m ³ /s

Le barrage de K'sob :

Le barrage du K'sob sur l'oued du même nom se trouve dans la Wilaya de M'sila à 15 km au nord. Le barrage a été mis en eau en 1940, puis surélevé en 1976. Le bassin versant du barrage a une superficie de 1460 km² (Figure 1.7, Tableau 1.5).



Figure 1.7 : Situation géographique du barrage de K'sob [13]

La retenue créée par le barrage représentait 29,5 hm³ après surélévation, mais ne représente plus que 12,34 hm³ depuis 2004 (Dernier levé) à cause de l'envasement. Ce barrage est

destiné à l'irrigation du périmètre de Bouna moussa et à l'alimentation en eau potable des villes de Annaba et Bouhadjr.

Tableau 1. 5 : Le barrage en chiffres [10].

Année de construction	1934
Année de Mise en eau	1940
Année de surélévation	1972 - 1976
Capacité	29,50 hm ³
Capacité dernier levé (2004)	12,34hm ³
Apport moyen annuel	51,50 hm ³
Envasement annuel	0,70 hm ³ /an
Surface du bassin versant	1 460 km ²
Hauteur	46,00 m
Longueur	280,00 m
Côte retenue Normale (R.N)	604,00 mNGA
Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E)	605,50 mNGA
Déversoir à SEUIL LIBRE	850,0 m ³ /s
Vidange de Fond	2 x 65,0 m ³ /s

1.3.4.2 L'obturation des organes de vidange

L'autre danger présenté par l'envasement est l'obturation des organes de vidange. La vanne de fond bloquée à plusieurs dizaines de mètres dans la vase ne permet plus de le vider.

1.3.4.3 La sécurité de l'ouvrage

L'envasement pose le problème de la stabilité de l'ouvrage. Lorsque la hauteur de la vase augmente, la poussée progresse au carré de la hauteur. Il faut alors diminuer le volume d'eau claire pour éviter la rupture (ex : rupture du barrage de Fergoug en 1927).

1.3.4.4 L'envasement des canaux d'irrigation

Les dépôts des sédiments dans une retenue de barrage destinée à l'irrigation ; par une eau chargée de particules fines qui va se déposer dans les canaux réduisant leurs sections et le débit d'eau. Le réseau d'irrigation se détériore rapidement. Le curage et le nettoyage des canaux d'envasement deviennent des opérations quotidiennes.

1.3.4.5 Dégradation de la qualité de l'eau

Les sédiments véhiculent des produits chimiques (nitrates, sulfates.....) provenant des apports et éléments fertilisants pour les cultures. Ils se déposent dans les réservoirs et entraînent une dégradation de la qualité de l'eau.

1.3.5 Processus de l'envasement

L'érosion est un phénomène très fréquent en Algérie. Il menace les potentialités en eau et en sol, car il est un des plus importants dans le monde. Pour un bassin versant de 3470 Km^2 , le volume spécifique moyen de transport solide serait de $2000 \text{ t/Km}^2/\text{an}$ avec des précipitations annuelles de 660 mm . Le phénomène se manifeste surtout en période de crues. Les eaux des cours d'eau transportent les sédiments par charriage ou en suspension. Les matières minérales solides sont transportées sur le fond par roulement ou suspension lorsque le débit liquide est très important (figure I.8).

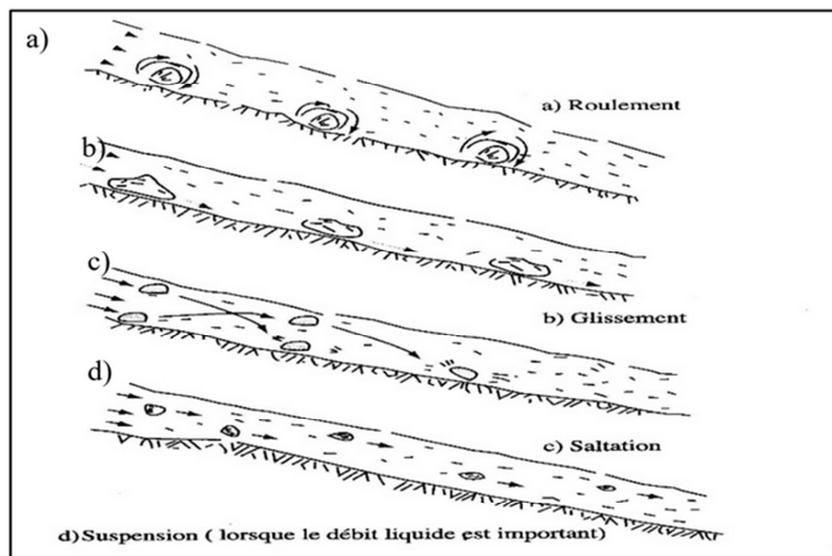


Figure I.8 : Type de charriage [14].

Les éléments fins sont maintenus en suspension. Leur concentration serait de 20 g/l en moyenne, mais dépasse les 265 g/l en période de crue.

Arrivées dans les retenues, les particules solides sont piégées dans les eaux calmes, puis se tassent et se consolident.

Les sédiments décantés sur les fonds peuvent subir des tassements et des consolidations au cours des temps. MIGNOT.C et PARTHENIADES [14] ont décrit ces différentes phases de tassement (figure I.9). Les particules minérales et organiques déposées par l'eau et le vent proviennent des usures des sols. L'érosion est la première étape du processus d'envasement d'un barrage. Elle se fait par des mécanismes physiques qui produisent la fragmentation des matériaux. Les matières solides sont transportées par ruissellement sur le fond et par roulement ou charriage. Lorsque le débit liquide est important les éléments fins sont maintenus en suspension. Arrivées dans la retenue, les particules sont piégées. Elles se tassent

et se consolident, puis finissent par se déposer sur le fond. Avec le temps elles réduisent la capacité du barrage. Alors il faut penser au dragage.

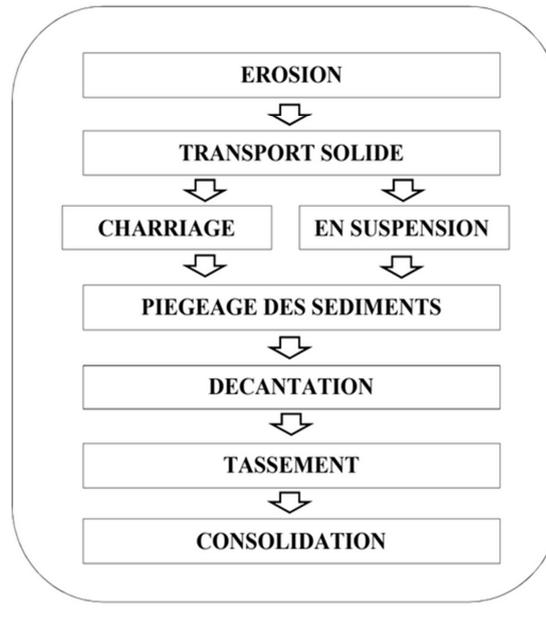


Figure I.9 : Organigramme du processus d'envasement d'une retenue [14]

Les sédiments grossiers (galets, graviers et sables), une fois déposés sur les fonds, restent stables dans le temps

1.3.6 Moyens de lutte contre l'envasement

Les barrages servant à l'adduction en eau potable ou à l'irrigation des cultures, il était donc vital de prendre des dispositions pour les sauvegarder et allonger leur durée de vie au maximum.

Parmi les mesures prises on peut citer : Le reboisement, la restauration des sols, la formation de banquettes, la plantation de végétation à longues tiges. A l'amont du barrage de Bouhanifia (wilaya de mascara) ont poussé des tamaris devenus avec le temps de véritables pièges à sédiments. Les services des forêts ont initié des programmes coûteux pour protéger les bassins versants. Des barrages de décantation ont été réalisés en amont des barrages importants visant à retenir une partie de la vase

La technique de dragage a été utilisée depuis les années cinquante. En Algérie le barrage de Fergoug, situé dans la région de Mohammedia a subi la première opération de dragage de 1986 à 1989, où plus de 10 millions m³ ont été retirés. Après remaniement local ; les sédiments sont aspirés par la drague et refoulés à travers une canalisation constituée ; d'une partie flottante et une partie fixe ; sur plusieurs centaines de mètres de longueur. La mise en

dépôt et le stockage des sédiments issus des opérations de dragage nécessitent une bonne gestion ; pour éviter des dommages sur l'environnement. Les volumes considérables de matières solides déposés dans les voisinages interpellent sur la nécessité de leur valorisation et le refus de les considérer comme des déchets inexploitable.

I.4. PRESENTATION DU BARRAGE DE FERGOUG

I.4.1. Situation et caractéristiques géologiques du site

Le barrage de Fergoug, est situé au nord-ouest de l'Algérie à environ 10 km au sud de la ville de Mohammedia (Perrégaux) sur la route de Mascara, et à 80 km de la wilaya d'Oran (Figure 1.10). Il est construit dès l'installation des premiers colons dans cette région (1845).

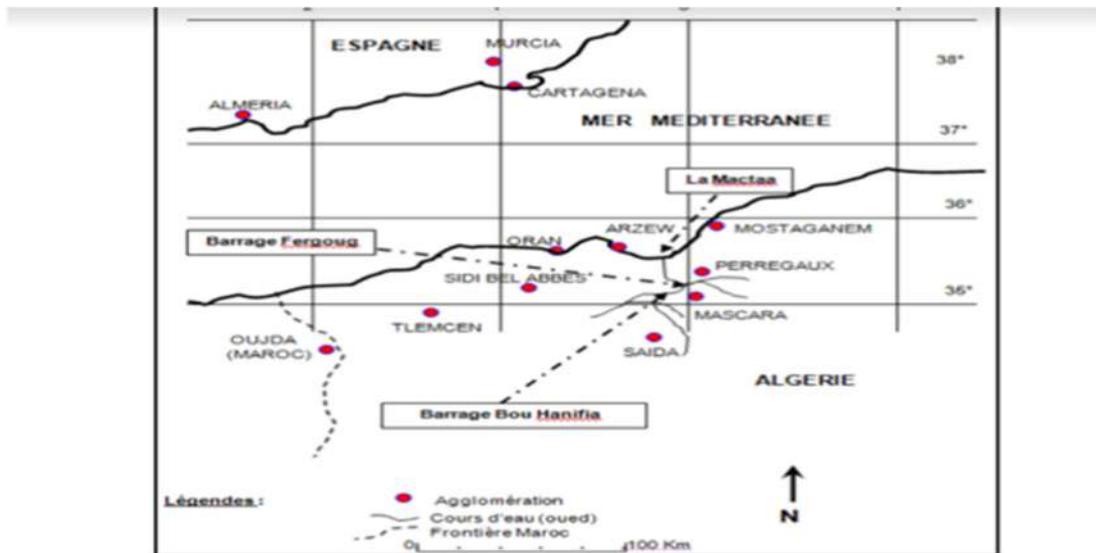


Figure I.10 : Situation géographique du barrage de Fergoug [15].

I.4.2. Le bassin versant du barrage de Fergoug

Un bassin versant est l'ensemble des dénivellations du relief qui fusionnent en un système hydraulique unique délimitant un déversement superficiel [16].

Le barrage de Fergoug est alimenté principalement par Oued El Hammam (Figure I.11) [16].

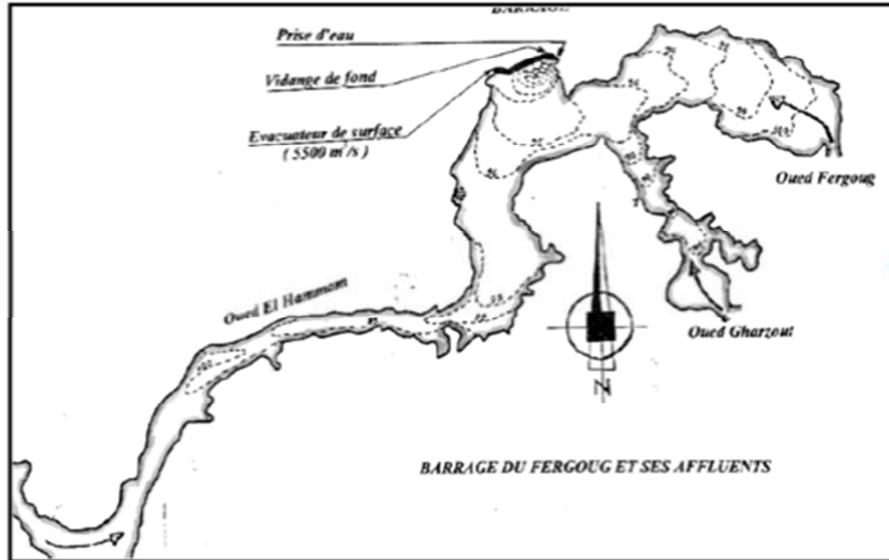


Figure I.11 : Le barrage du Fergoug, ses ouvrages annexes et ses affluents [16].

I.4.3. Situation actuelle du barrage

Dans son état actuel, le barrage présente un fort taux d'envasement. Sa capacité de stockage est estimée à 3,12 millions de m³ suivant le levé bathymétrique de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) [17].

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

Les photographies suivantes donnent un aperçu réel de la situation actuelle du barrage de Fergoug (Figures I.12)



Figure I.12 : Vue du barrage de Fergoug (2012) [19].



Figure I.13 : La digue et la cuvette envasée du barrage de Fergoug (2012) [19].

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

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

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

I.5. PRESENTATION DU BARRAGE DE CHORFA

Le barrage Chorfa (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 82 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 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 [16].

La situation géographique du barrage de Chorfa est représentée dans la Figure I.14



Figure 1.14 : Situation géographique de la ville de Mascara et du barrage de Chorfâ [19].



Figure 1.15 : Vue générale du barrage de Chorfâ [19].

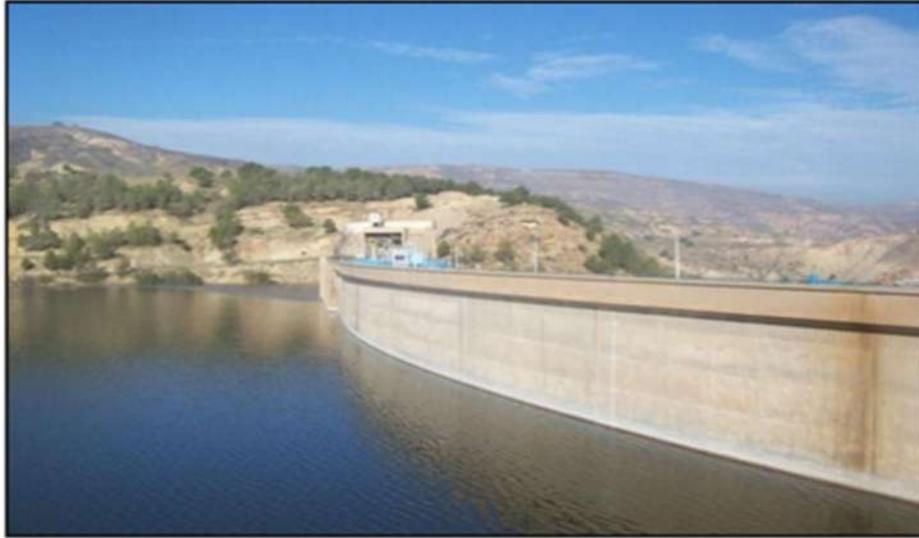


Figure I.17 : Vue du côté interne de la digue du barrage Chorfa [19].

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

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

I.6. CONCLUSION

De nombreux réservoirs destinés à l'irrigation et à l'alimentation en eau potable sont en cours de réalisation ou en projet. Malheureusement ces richesses se dégradent de jour en jour par la sédimentation accélérée. La lutte contre l'envasement, représente donc un enjeu considérable le barrage créant une retenue qui constitue une fosse à sédiments de grande taille ; ou au fil des années la décantation des dépôts réduira la capacité de stockage prévue. La lutte contre la sédimentation est toujours possible par les opérations de dragage hydraulique ou le dragage mécanique. Des zones de rejet sont prévues pour recevoir les déblais, Alors se créent dans les alentours du barrage des aires de stockage. Il est impératif de penser à les éliminer ; la meilleure manière serait de les valoriser.

Les sédiments issus des barrages de Chorfa et Fergoug ont été concernés par cette valorisation et ont fait l'objet de plusieurs recherches menées par des doctorants au sein du département de

Génie Civil de l'Université de Mostaganem de 2010 à 2019. Des résumés de ces études suivis d'un bilan seront présentés dans les chapitres qui suivent.

CHAPITRE II : RESUME DE LA RECHERCHE DE BELARIBI O. [19]

II.1 INTRODUCTION

Cette recherche a été engagée dans un but écologique, économique et technique en valorisant la vase traitée thermiquement, issue des sédiments de dragage des barrages de Chorfa et Fergoug, comme étant un matériau de construction à part entière substituable en partie au ciment entrant dans la composition des BAP pour lequel le comportement physico-mécanique et de durabilité a été suivi.

Un large protocole expérimental a été adopté pour mettre en évidence l'effet de l'incorporation de 20 % de vase substituée au ciment sur le développement des résistances mécaniques et la durabilité des bétons autoplaçants. Concernant la durabilité, il s'agissait d'étudier la résistance de ces bétons aux attaques des sulfates (Na_2SO_4 et MgSO_4), des acides (HCl et H_2SO_4) et la carbonatation accélérée. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux relatifs au béton autoplaçant témoin et au BAP à base de pouzzolane naturelle.

II.2 PROGRAMME EXPERIMENTAL

II.2.1 Préparation de la vase

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

La vase draguée est passée par les étapes suivantes (Figure I.18) :

1. **Séchage** : L'échantillon de vase est d'abord séché par passage à l'étuve ($105\text{ }^\circ\text{C}$) afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage ainsi que son tamisage.
2. **Concassage** : La vase étuvée est concassée pour faciliter son broyage.
3. **Broyage** : La vase concassée est totalement broyée.
4. **Tamisage** : La vase broyée est tamisée par voie sèche à travers un tamis de $80\text{ }\mu\text{m}$ où seul le passant est considéré par la suite.
5. **Calcination** : C'est un traitement thermique effectué sur la vase préparée préalablement par cuisson à $750\text{ }^\circ\text{C}$ [16].

La vitesse de cuisson doit être réglée à $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ afin d'éviter les chocs thermiques, ensuite, la température de cuisson qui est de ($750\text{ }^\circ\text{C} \pm 5$) est maintenue constante pendant 05 heures pour

obtenir à la fin le produit final qui est la vase calcinée. Celle-ci doit être conservée à l'abri de l'air et de l'humidité dans des sacs hermétiques.

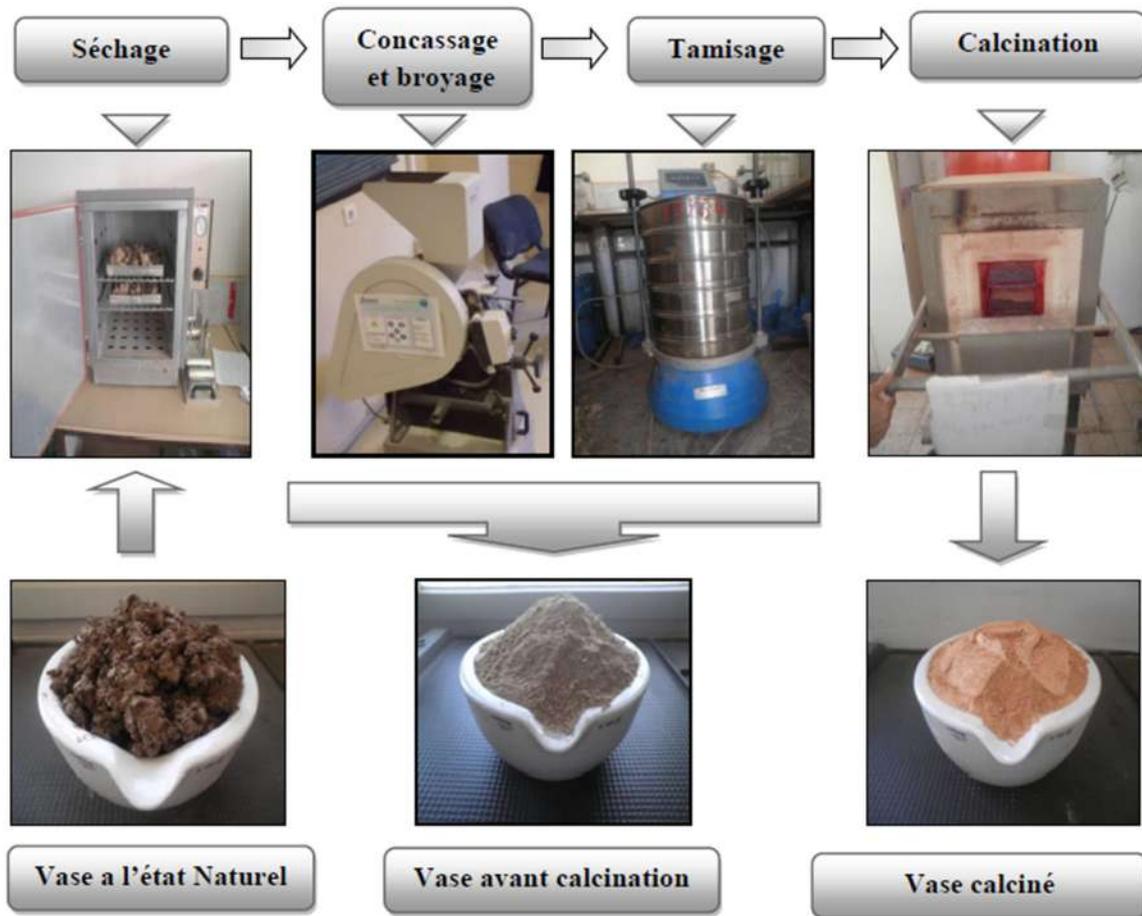


Figure II.1 : Les étapes de préparation de la vase.

II.2.2 Les formulations étudiées

Le tableau II.1 donne la composition des différents BAP étudiés au cours de ce travail de recherche (béton témoin **BAP T**, béton avec vase de Chorfa **BAP VC**, béton avec vase de Fergoug **BAP VF** et béton avec pouzzolane naturelle de Béni-Saf **BAP PZ**).

Tableau II.1 : Compositions des BAP

Compositions (Kg/m ³)	BAP T	BAP VC	BAP VF	BAP PZ
Ciment	448.16	407.61	407.96	410.23
Vase (Chorfa)		81.52	-	-
Vase (Fergoug)	-	-	81.59	-
Pouzzolane N	-	-	-	82.05

Eau	224.08	203.81	203.98	205.12
Superplastifiant	8.20	11.01	10.61	9.64
Sable de mer (0/4)	560	560	560	560
Sable de concassage (0/4)	251	251	251	251
Gravier 3/8	333	333	333	333
Gravier 8/15	499	499	499	499

Les différentes caractéristiques des quatre BAP sont illustrées dans le tableau II.2 :

Caractéristiques	BAP T	BAP VC	BAP VF	BAP PZ	
E/C	0.5	0.5	0.5	0.5	
Ajout/Ciment (%)	-	20	20	20	
Sp/C (%)	1.83	2.7	2.60	2.35	
Volume de pâte(l/m³)	375	375	375	375	
G/S	1.02	1.02	1.02	1.02	
Volume de squelette granulaire (l/m³)	625	625	625	625	
Masse volumique théorique (Kg/m³)	2323.44	2349.02	2347.14	2350.04	
Masse volumique réelle à l'état (Kg/m³)	Frais	2371.36	2373.22	2371.36	2392.74
	Durci	2362.47	2364.33	2362.47	2379.81

Tableau II.2: Caractéristiques des BAP confectionnés

Les premiers essais réalisés ont concerné l'étude des propriétés à l'état frais afin d'estimer la fluidité et la ségrégation dynamique et statique (essais d'étalement au cône, de la boîte en L et de stabilité au tamis).

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

II.3 RESULTATS DE LA RECHERCHE

II.3.1 Etude à l'état frais

Les résultats des essais, de caractérisation des BAP à l'état frais sont représentés dans le Tableau II.3

Tableau II.3 : Les résultats des essais de caractérisation à l'état frais

Essai	Béton		BAP VC	BAP VF	BAP PZ
		\emptyset (cm)	70	70	68
Etalement	t_{50} (s)	3.56	3.75	3.83	3.69
	h_2/h_1 (%)	89	95	83	86
Boite en L	t_{20} (s)	2.39	2.56	2.58	2.41
	t_{40} (s)	3.76	3.38	3.98	3.80
	\emptyset (cm)	62	59	58	59
Essai de J-Ring	h_r (mm)	7.3	7.2	6.9	6.9
	h_m (mm)	5.4	5.3	5.1	5.0
	$2h_r-h_m$ (mm)	9.2	9.1	8.7	8.8
Stabilité au tamis	%	6.91	4.52	5.11	5.87
Essai de ressuage	% _o	1.21	1.10	1	1.09

Les résultats ont montré que les quatre BAP testés vérifient la condition d'étalement imposée par la recommandation de l'AFGC ($60 \text{ cm} \leq \emptyset \leq 75 \text{ cm}$) [20].

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

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

La ségrégation dynamique des BAP est caractérisée par l'essai de la boîte en L, les formulations ont présenté des taux de remplissage supérieur à 80 %. Par conséquent ces bétons ont montré une bonne mobilité dans un milieu confiné et cela malgré les armatures qui font obstacle.

L'essai de J-Ring a permis d'apporter des informations sur la déformabilité restreinte, et l'homogénéité du mélange. Sur ce point, aucun problème n'a été signalé puisque les quatre BAP n'ont présenté aucun blocage à travers les armatures et ont satisfait la condition de l'essai.

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

Tous les bétons ont respecté la condition de l'essai du ressuage conseillé dont la valeur doit être inférieure ou égale à 3% en volume.

II.3.2 Résistances mécaniques en compression

Les résultats obtenus en termes de résistances mécaniques (Figure II.2) ont permis de montrer que pour un taux de substitution de 20% la vase de barrage du Fergoug améliorerait plus la résistance des mortiers au jeune âge (3, 7 et 28 jours), par contre la contribution de la vase du barrage de Chorfa a été plus marquée à long terme (60, 90 et 180 jours).

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

Les BAP sont connus par leur structure dense ce qui les qualifie de matériaux plus résistants par rapport aux bétons ordinaires envers des phénomènes affectant la durabilité.

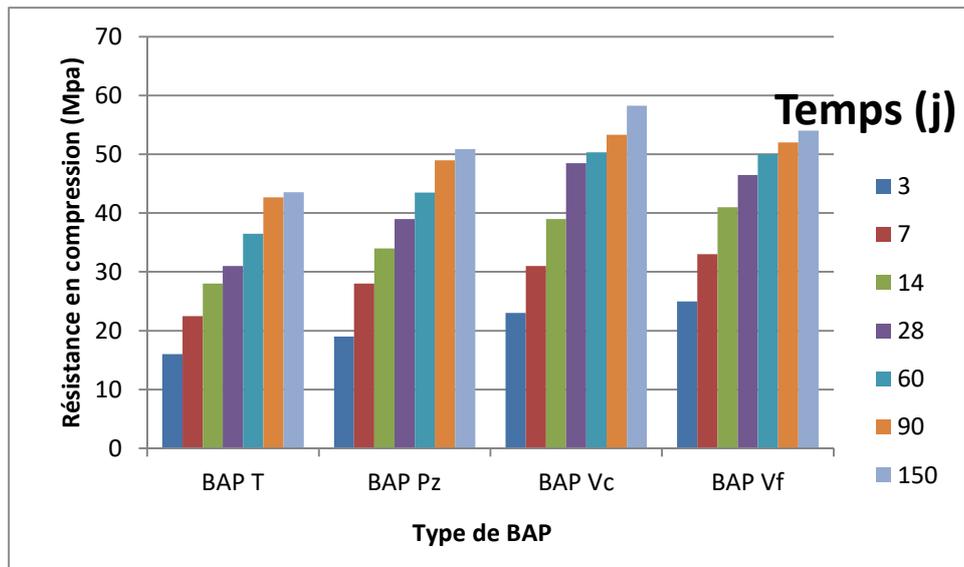


Figure II.2 : Evolution des résistances mécaniques des BAP en fonction du temps.

II.3.3 Durabilité

Les résultats présentés touchent les propriétés chimiques des BAP caractérisant leur résistance aux attaques chimiques des sulfates, des acides et du CO₂ (Figures II.3 ; II.4 ; II.5 ; II.6 ; II.7).

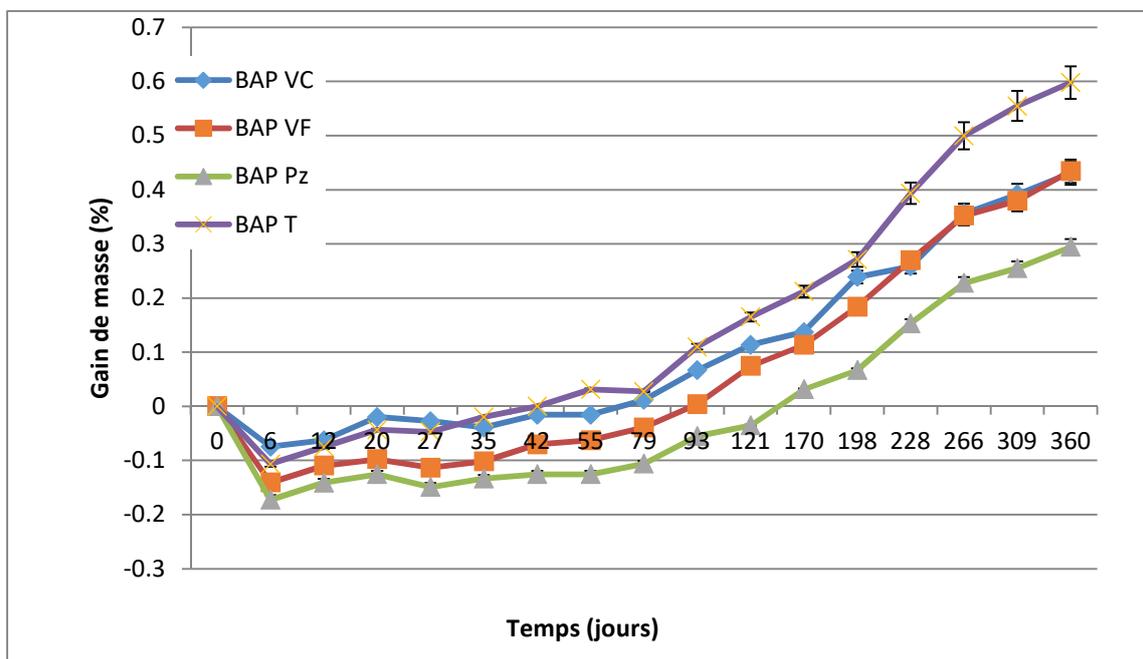


Figure II.3: variation de la masse des échantillons immergés dans la solution de 5% de sulfate de sodium

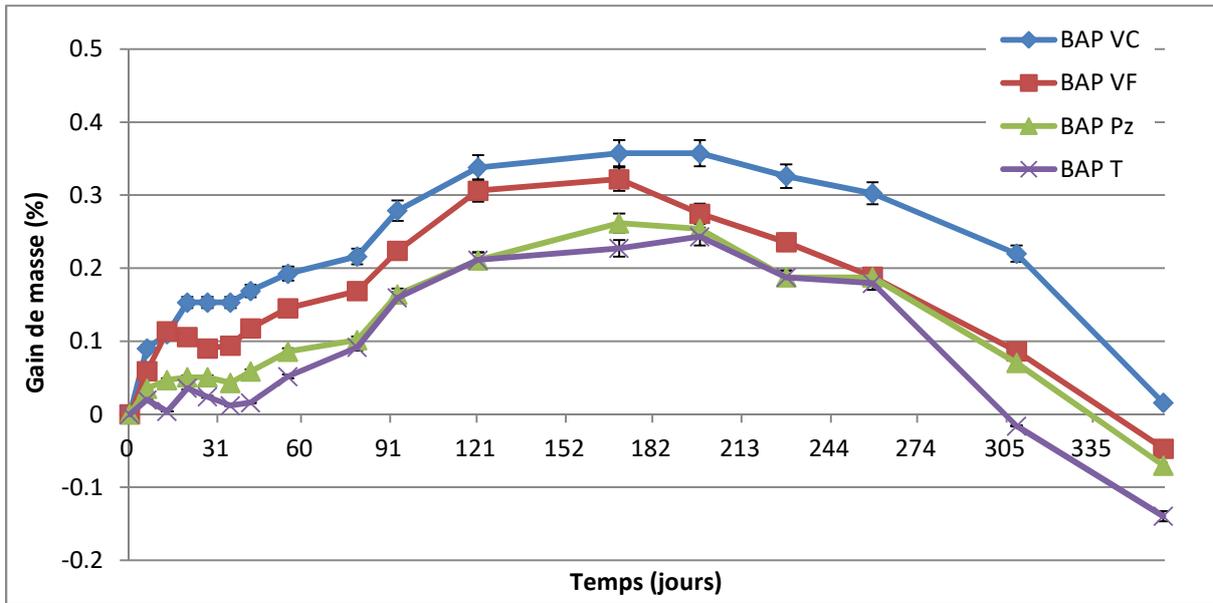


Figure II.4: variation de la masse des échantillons immergés dans la solution de 5% MgSO₄.

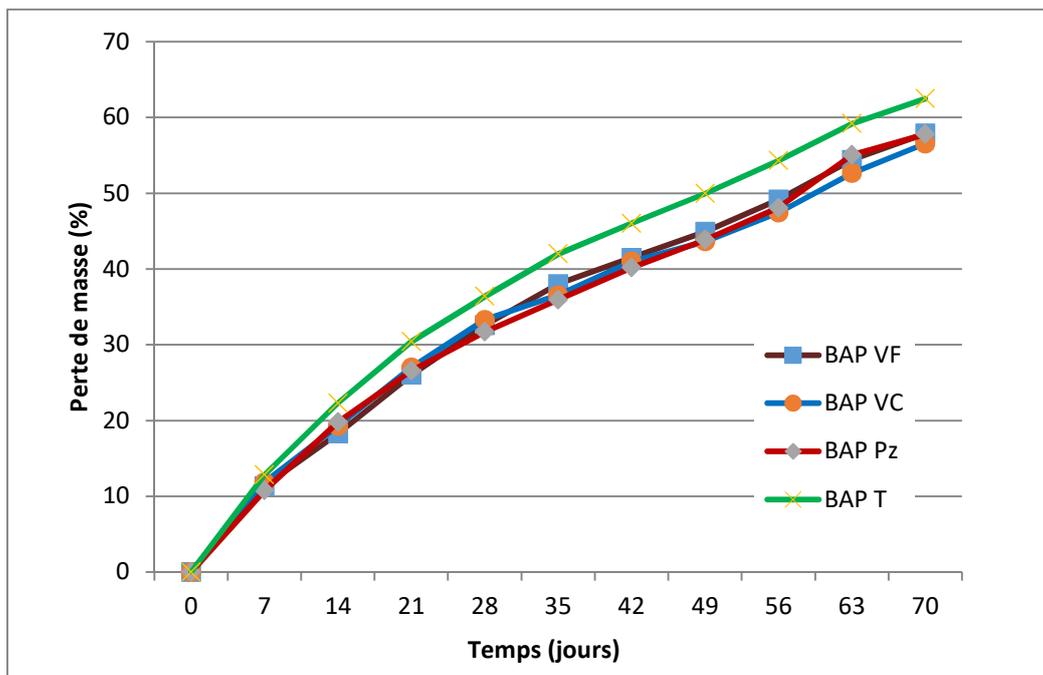


Figure II.5 Perte de masse des bétons âgés de 90j et immergés dans la solution 5% H₂SO₄

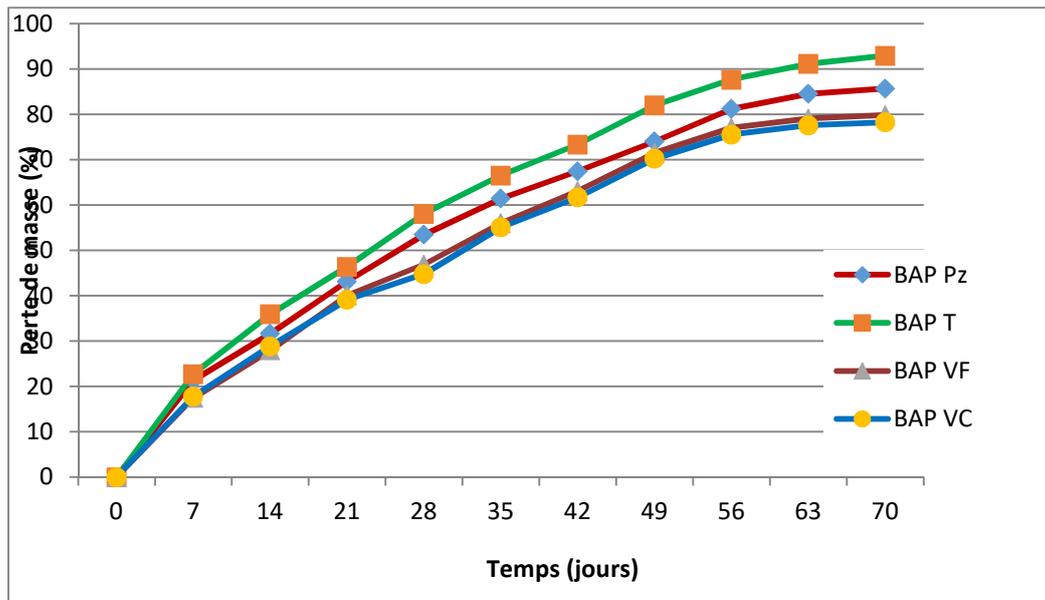


Figure II.6 Variation de la perte en poids des BAP en fonction de la période d'immersion en 5% HCl.

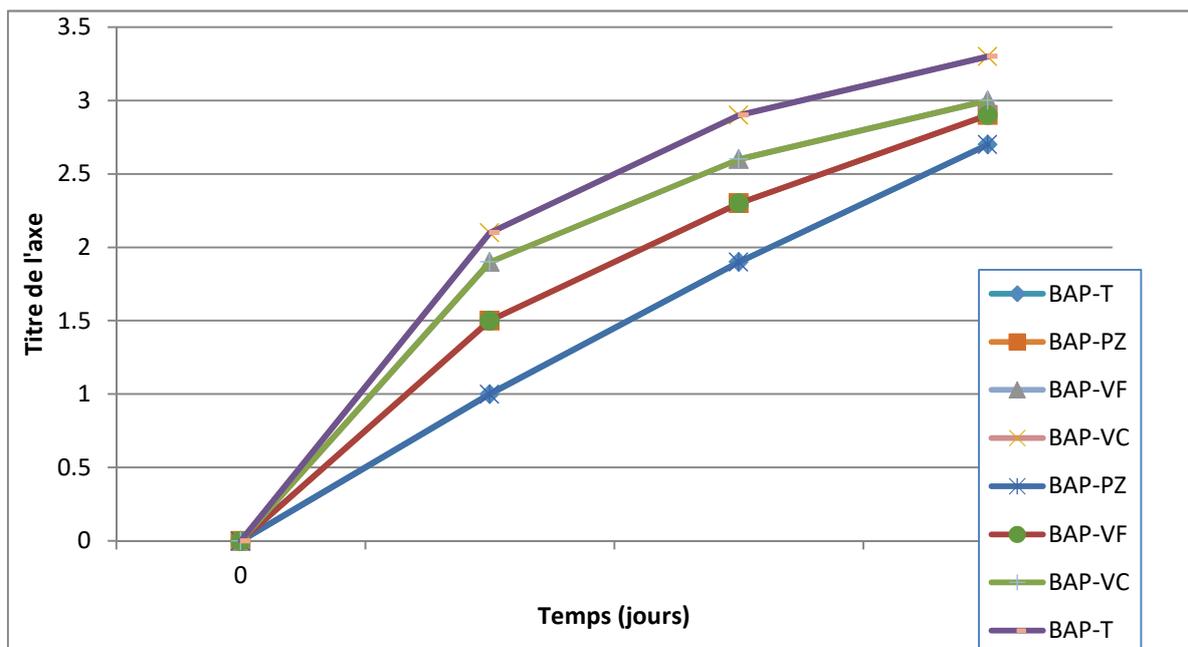


Figure II.7 : Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée des bétons.

Les résultats des BAP avec ajouts et BAP T ont montré que la comparaison entre ces deux types de béton est en rapport direct avec l'addition minérale utilisée. En effet, le BAP.T est plus sensible à la dégradation par l'attaque du sulfate de sodium.

Le BAP-VC a présenté les meilleures résistances au sulfate de magnésium par rapport aux autres BAP à 360 jours d'immersion dans la solution $MgSO_4$.

L'incorporation de la vase calcinée dans les BAP a amélioré la résistivité de ces bétons envers l'attaque de l'acide sulfurique plus que celle de l'acide chloridrique. Le BAP VC et le BAP VF ont présenté des performances très comparables à celles du BAP PZ et bien meilleures que celles du BAP T.

La présence de la vase dans la pâte des BAP a réduit sensiblement le risque de carbonatation de ces bétons par rapport à celui des BAP à base de pouzzolane naturelle. Malgré la faible différence, le BAP PZ, le BAP VC et le BAP VF ont mieux résisté à la carbonatation. Le BAP-T a présenté des épaisseurs des fronts de carbonatation légèrement supérieures à celles des BAP avec ajouts.

II.5 CONCLUSION

La recherche de Belaribi [19] a confirmé à travers tous les résultats présentés dans son travail, que la vase provenant de Chorfa et Fergoug peut être utilisée avec succès, comme addition minérale dans les formulations des BAP. Pour des taux de substitution de 20% la vase du barrage de Fergoug améliorerait la résistance des mortiers au jeune âge (3, 7 et 28 jours), par contre celle du Chorfa contribuerait à une amélioration à long terme (60, 90 et 180 jours).

L'incorporation de ce matériau naturel dans les BAP conduit en général à des performances très comparables, voire meilleures (comme pour les acides et les sulfates) à celles des bétons incorporant la pouzzolane naturelle. La possibilité de valoriser la vase activée thermiquement dans le but d'en fabriquer un substitut aux liants hydrauliques d'usage courant est réalisable.

CHAPITRE III : RESUME DE LA RECHERCHE DE SAFER O. [21]

III.1 INTRODUCTION

La recherche de Safer [21] a eu pour objectif d'enrichir et approfondir les recherches entamées sur la vase issue des sédiments de dragage des barrages en valorisant celle du barrage de Chorfa et donc encourager son utilisation à des fins d'exploitation comme matériau noble entrant dans la composition du béton. Elle a consisté en la détermination des données techniques pour la fabrication de matériaux en vue de l'obtention d'un béton ordinaire répondant à des normes acceptables.

Pour ce faire, un large protocole expérimental a été adopté. Il a été question de mettre en évidence l'effet de l'incorporation de 10, 20 et 30 % de vase substituée au ciment dans les bétons sur le développement des résistances mécaniques et étudier la durabilité de ces bétons envers les attaques des sulfates ($MgSO_4$), de l'eau de mer, de l'acide (H_2SO_4), l'absorption capillaire, la porosité accessible à l'eau et la carbonatation naturelle. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux relatifs au béton ordinaire témoin.

III.2 LES FORMULATIONS ETUDIEES

Quatre formulations de béton ont été élaborées ; trois incorporant différents dosages de vase (BOV 10%, BOV 20% et BOV 30%) et un témoin (BOT 00%) pour le besoin de comparaison, le tableau III.1 donne les compositions des différents bétons étudiés.

Tableau III.1: Composition des bétons d'étude

Désignation	Ciment kg/m ³	P/L (%)	Addition kg/m ³	Gravier kg/m ³		Sable kg/m ³	Eau kg/m ³	E/L	P kg/m ³
				3/8	8/15				
BOT 00%	402	00	00	179	912	663	201	0.5	00
BOV 10%	363.6	0.3	35.33	179	912	663	199.4	0.5	1.19
BOV 20%	324.8	0.4	71.02	179	912	663	197.9	0.5	1.58
BOV 30%	286.3	0.65	107.31	179	912	663	196.8	0.5	2.56

Les caractérisations des bétons sont données par le tableau III.2

Tableau III.2: caractéristiques des bétons d'étude

Caractéristiques	BOT 00%	BOV 10%	BOV 20%	BOV 30%	
E/L	0.5	0.5	0.5	0.5	
Ajout/Ciment (%)	00	10	20	30	
Volume de pâte (l/m ³)	334	334	334	334	
G/S	1.65	1.65	1.65	1.65	
Volume de squelette granulaire (l/m ³)	666	666	666	666	
Masse volumique théorique (Kg/m ³)	2357	2353.7	2349.3	2347	
Masse volumique réelle à l'état (Kg/m ³)	Frais	2475.6	2468.9	2454.5	2441.6
	Durci	2461.7	2448.1	2433.0	2421.2

III.3. RESULTATS DE LA RECHERCHE

III.3.1 Etude à l'état frais

Les résultats des essais, de caractérisation des BAP à l'état frais sont représentés dans la Figure III.1.

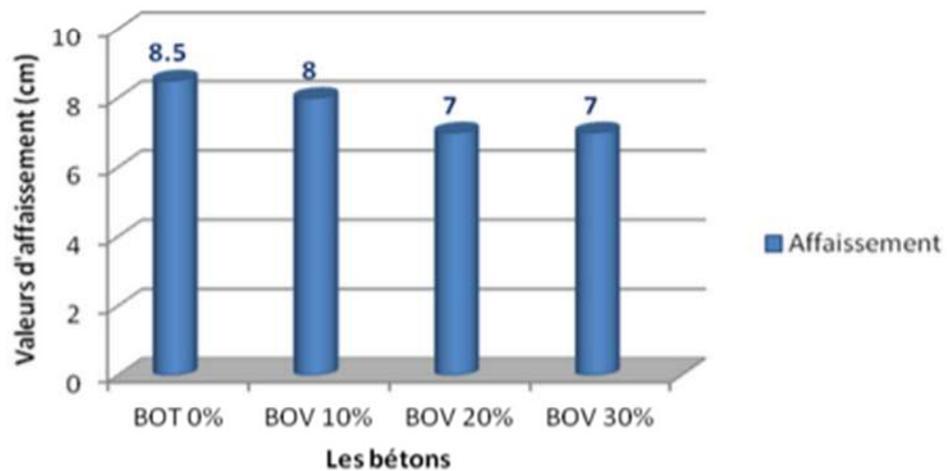


Figure III.1 : Affaissements des bétons confectionnés.

Les affaissements des bétons d'étude ont été conformes à la norme NF P 18-451 et à l'affaissement exigé pour la formulation de nos bétons ($8\pm 1\text{cm}$) ce qui leur a attribué le caractère de bétons plastiques.

Le Tableau III.3 présente l'influence de la vase sur le taux du plastifiant.

Désignations	BOT 0%	BOV 10%	BOV 20%	BOV 30%
Plastifiant/Liant (%)	0	0.3	0.4	0.65

Tableau III.3 : Taux d'adjuvant en fonction du liant.

Le pourcentage de l'adjuvant a augmenté proportionnellement à celui de la vase. La plage d'utilisation recommandée par le producteur de l'adjuvant (0,3 à 1%) nous a limités dans le taux de substitution de la vase par le ciment. Le dosage maximal de vase étant de 30%.

III.3.2 Evolution des résistances mécaniques en compression

Les résultats des mesures des résistances à la compression ont été obtenus par écrasement des éprouvettes ($10\times 10\times 10$) cm^3 à base de 10, 20 et 30% et un béton témoin, la figure III.2 montre les résistances à la compression des bétons en MPa en fonction du temps et du dosage en vase.

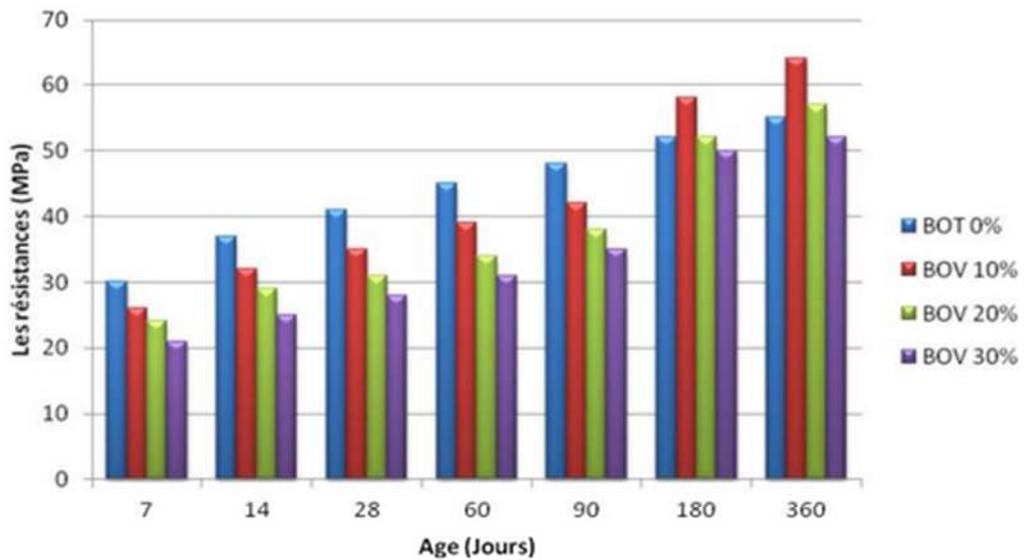


Figure III.2 : Résistances à la compression des bétons en MPa en fonction du temps.

Les résultats ont montré que le béton témoin atteint de bonnes performances à la compression, puisqu'il n'a pas affiché moins de 55 MPa à 360 jours, il est avantageé jusqu'à l'âge de 90 jours. Les résistances mécaniques du béton à base de vase, et tendent en fin de parcours à dépasser celles du béton témoin. Il a atteint une résistance à la compression avoisinant les 64 MPa à 360 jours. Les autres bétons à base de 20 et 30% de vase ont également donné des résultats très satisfaisants.

Pour mieux visualiser l'évolution de la résistance, les rapports des résistances du béton de vase et le témoin ont été comparés (figure III.3).

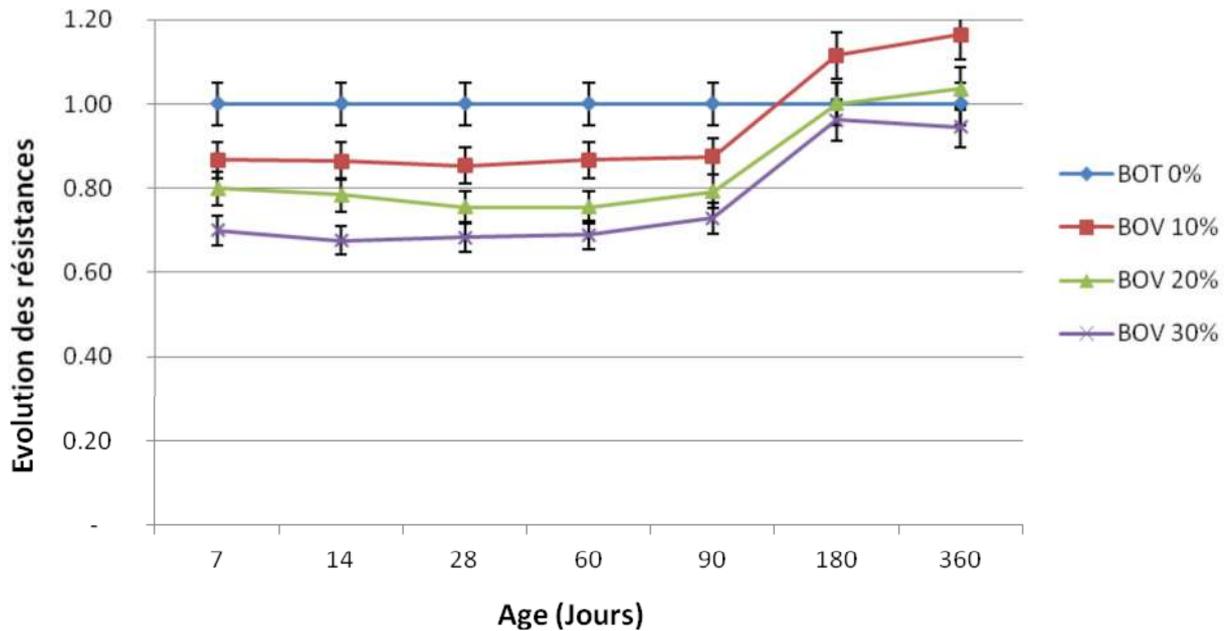


Figure III.3 : Evolution de la résistance des bétons à base de vase par rapport au béton témoin

Tous les mélanges de bétons à base de vase et celui de référence donnent de bonnes performances mécaniques.

La vase issue du barrage de Chorfa a amélioré la résistance à la compression à long terme car elle a donné naissance à un second C-S-H qui améliore le remplissage des pores et par conséquent augmente la résistance mécanique.

Les dosages de 10 et 20% de vase substituée au ciment sont optimaux pour développer rapidement des résistances à court terme.

Les résistances de béton qui contient une substitution élevée de vase 30% ont évolué lentement par rapport aux autres bétons.

III.3.3 Durabilité

Les résultats présentés dans cette étude sont rapportés aux propriétés chimiques des bétons ordinaires élaborés à savoir le béton témoin et les bétons incorporant la vase calcinée, caractérisant leur résistance aux attaques chimiques des sulfates, des acides, de l'eau de mer,

l'absorption capillaire (la sportivité), la diffusion des ions chlorures, la porosité accessible à l'eau, la perméabilité à l'eau et de la carbonatation naturelle.

III.3.3.1 Attaque par le sulfate de magnésium ($MgSO_4$)

Les essais consistaient à suivre l'évolution des masses des échantillons immergés dans des solutions de 5% $MgSO_4$.

Le changement de la masse des échantillons est représenté en fonction du temps d'immersion sur la figure III.6. La référence est la dernière mesure avant immersion

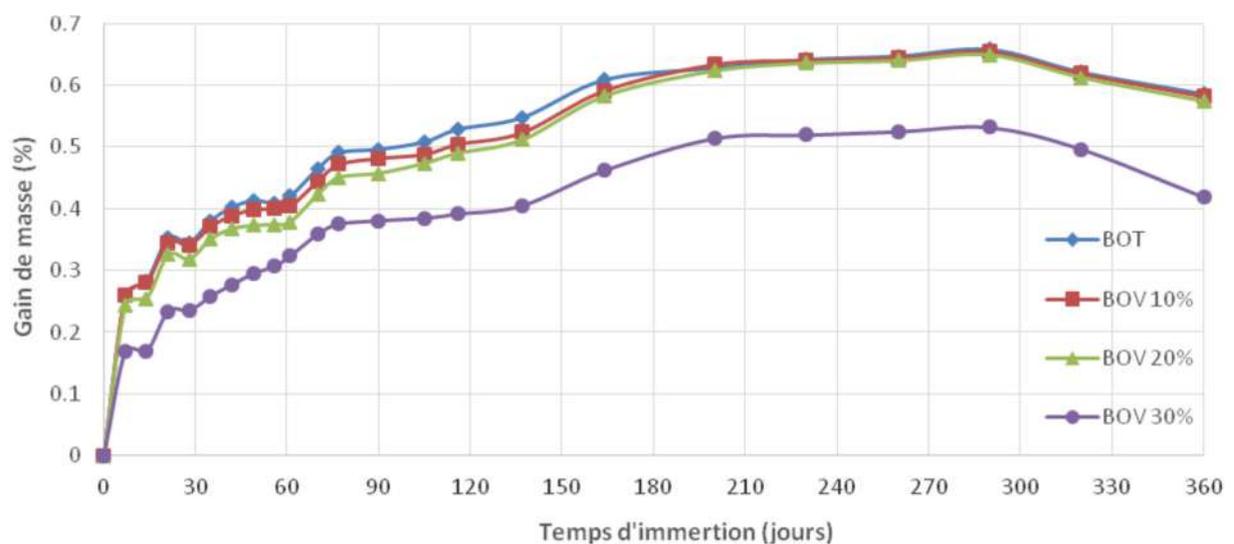


Figure III.6: variation de la masse des échantillons immergés dans la solution de 5% $MgSO_4$

Les éprouvettes immergées dans la solution sulfatique $MgSO_4$ avec une concentration à 5%, se sont distinguées par une augmentation de la masse dès les premiers jours de l'immersion avec une continuité d'augmentation jusqu'à 270 jours et un plus faible gain de masse de 0.37% pour le BOV 30% de vase. Ce phénomène est justifié par la formation des produits volumineux, l'attaque du béton par les sulfates de magnésium engendre une réaction chimique qui se produit en présence d'eau entre les ions de sulfate et l'aluminate de calcium hydraté C_3A et les éléments constitutifs de l'hydrate de calcium de la pâte de ciment durci.

III.3.3.2 Attaque de l'eau de mer

Le changement de la masse des échantillons immergés dans l'eau de mer est représenté en fonction du temps d'immersion sur la figure III.8. La référence est la dernière mesure avant immersion

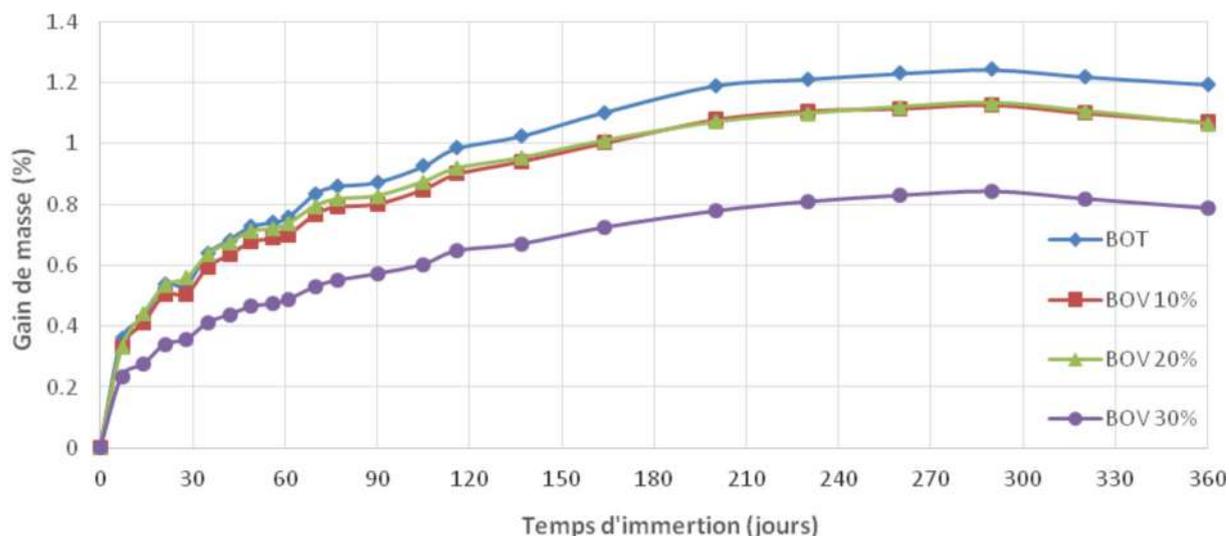


Figure III.8: variation de la masse des échantillons immergés dans la solution de l'eau de mer

Les éprouvettes immergées dans la solution de l'eau de mer, se sont distinguées par une augmentation de la masse dès les premiers jours de l'immersion et il y a une continuité d'augmentation jusqu'à 320 jours. Ce phénomène est justifié par la formation des produits volumineux.

Le BOV 30% présente un gain de masse moins important que celui des BOT, BOV 10% et BOV 20%. Le BOT est plus sensible à la dégradation par l'attaque de l'eau de mer à long terme.

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

III.3.3.3 Attaque par l'acide H_2SO_4

L'évolution de la masse et les résistances à la compression des échantillons immergés dans une solution saturée en acide sulfurique (2% en volume) ont été suivies.

Le suivi de la perte en poids en fonction du temps des éprouvettes des bétons immergés dans la solution à base d'acide sulfurique H_2SO_4 sont illustrés par la figure III.10.

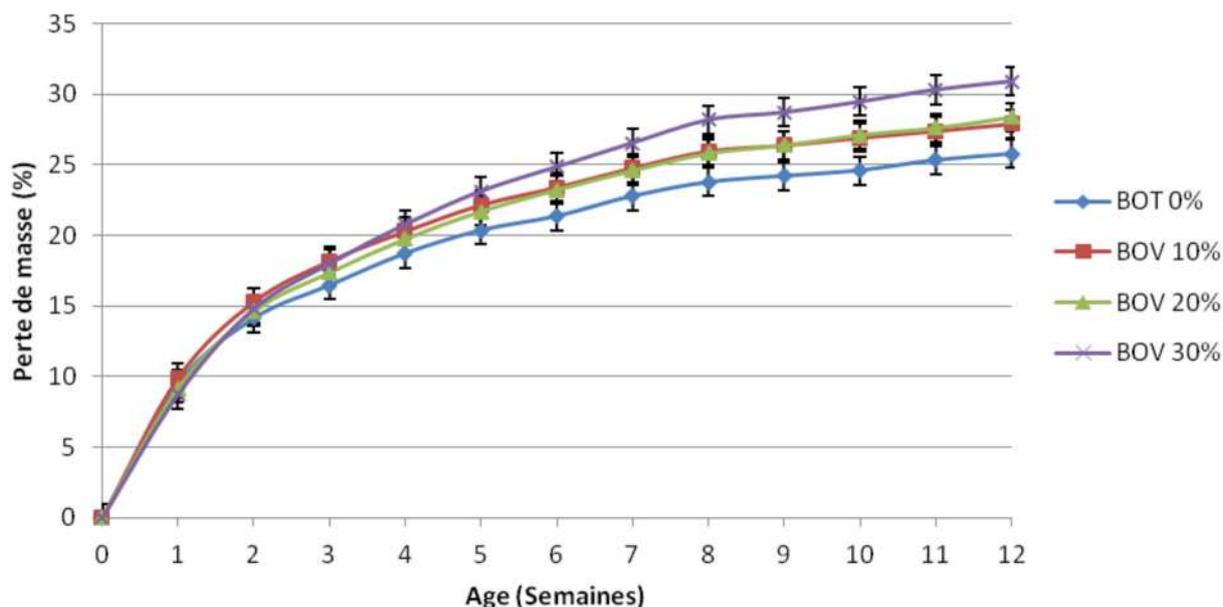


Figure III.10 : Perte de masse des bétons âgés de 90j et immergés dans la solution H_2SO_4

Les résultats obtenus sur les quatre formulations testées par immersion dans la solution d'acide H_2SO_4 ont montré, en premier lieu, qu'après 90 jours d'attaque, le béton témoin semble le plus résistant. La perte de masse due à l'agressivité de l'acide H_2SO_4 a varié d'un béton à un autre selon le dosage en vase, les bétons à base de 30% de vase ont présenté une perte de masse légèrement importante par rapport aux autres bétons en particulier pour des durées d'attaque avancées.

Par comparaison entre les différents bétons, il a été remarqué que tous les échantillons ont subi des dégradations, la même résistance des bétons à 10 et 20% de vase envers l'attaque du H_2SO_4 a été notée.

III.3.3.4 La Carbonatation naturelle

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

Les résultats obtenus (Figure III.11) montrent que le BOT 0% présente des profondeurs de carbonatation légèrement supérieures par rapport aux bétons à base de vase calcinée, d'où l'effet bénéfique de l'ajout de l'addition.

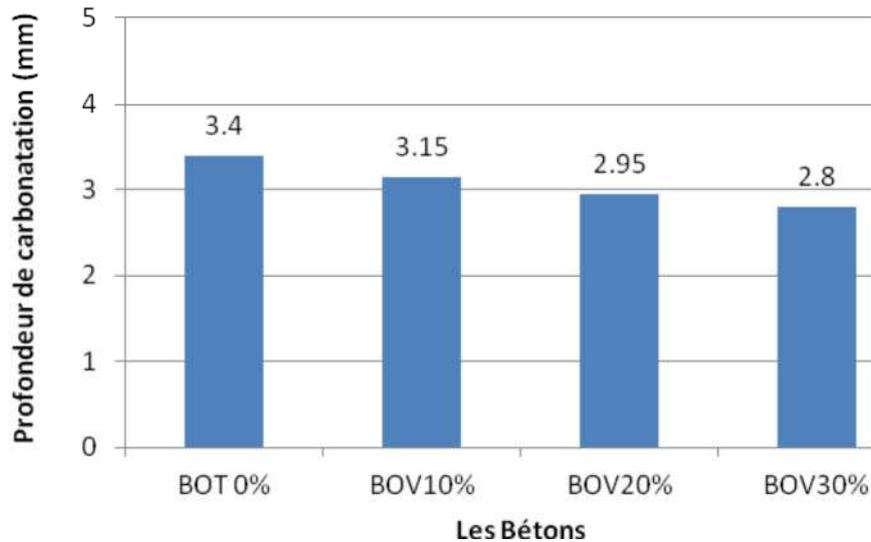


Figure III.11: Profondeur de carbonatation naturelle des bétons d'études, après 12 mois à l'air libre de laboratoire

Des recherches telles que celle de Siad [22], ont rapporté l'effet positif des additions pouzzolaniques tels que la cendre volante et la pouzzolane naturelle et qui peut être dû à la grande densification de la structure poreuse grâce à la réaction pouzzolanique.

III.3.3.5 L'absorption capillaire (la sorptivité) et la porosité accessible à l'eau

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.

Les coefficients de sorptivité (S) après 24h d'essai, sont présentés pour les quatre formulations de bétons après 28 de conservation sous forme d'histogramme dans la figure III.12 (AFPC-AFREM) [23].

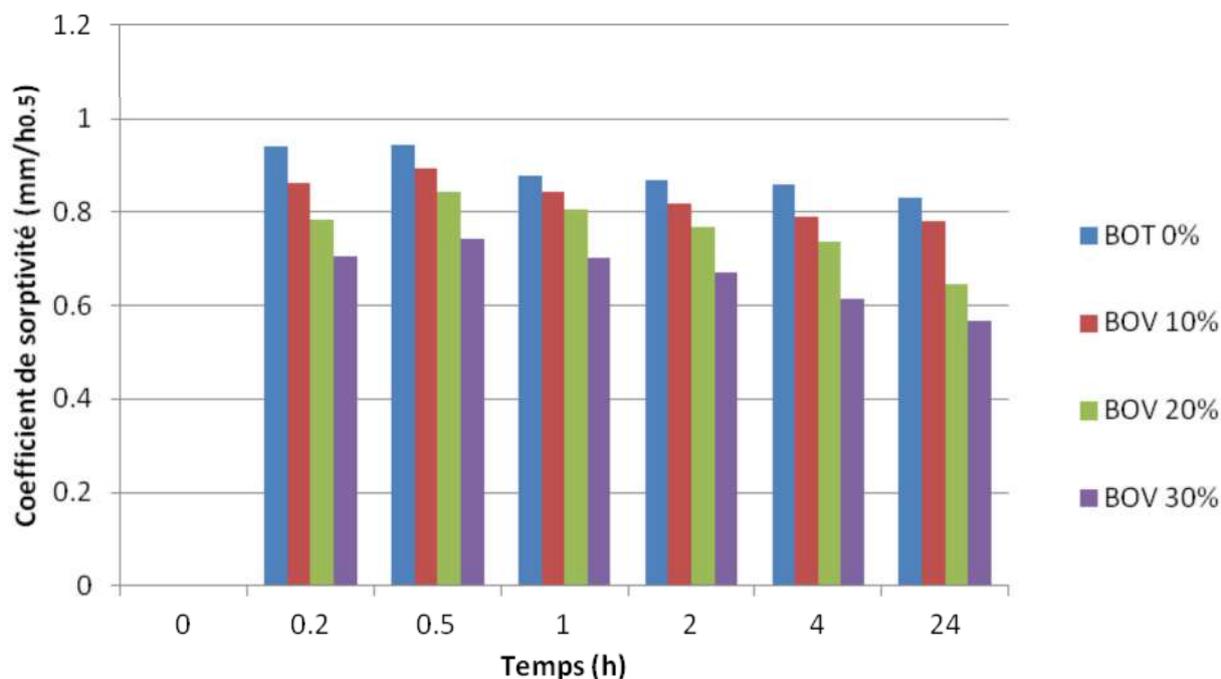


Figure III.12 : Coefficients de sportivité des différents bétons d'étude, essai réalisé après 28 jours de conservation.

Les résultats ont montré des faibles coefficients d'absorptivité des bétons à base de vase par rapport à ceux du béton témoin.

La connaissance de la structure poreuse et notamment de la porosité ouverte d'un béton est tout à fait pertinente pour traduire la résistance d'un matériau cimentaire.

Les différents résultats de calcul de la porosité accessible à l'eau des échantillons sont présentés dans la figure III.13.

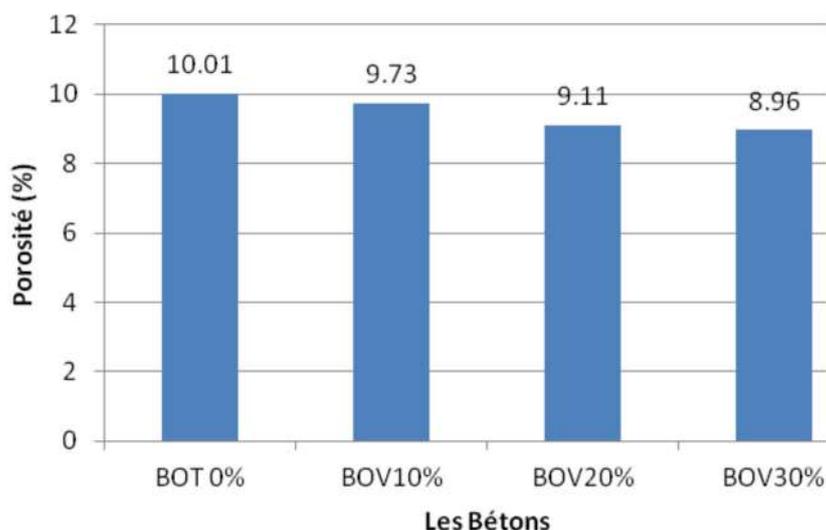


Figure III.13 : Porosité accessible à l'eau des bétons.

Les résultats ont montré que les bétons contenant la vase ont une porosité moindre par rapport aux autres bétons. Cela est dû peut-être aux bulles d'air et des granulats ($D_{max} \leq 15 \text{ mm}$) qui ont une influence notable sur sa porosité.

La vase calcinée a rempli les pores, ce qui s'est traduit par une diminution de porosité conduisant à une réduction de la perte de masse [24].

III.3 CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre a été de faire le point sur les résultats de recherche menée par Safer [21] sur l'effet de l'incorporation de la vase calcinée de barrage de Chorfa sur la résistance des bétons vis-à-vis des attaques sulfatiques (MgSO_4), l'eau de mer, acides (H_2SO_4), carbonatation naturelle, l'absorption capillaire et la porosité accessible à l'eau.

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- ◆ Le BOV 10% et le BOV 20% ont présenté des résistances meilleures à l'attaque du sulfate de magnésium par rapport aux autres bétons à 360 jours d'immersion dans la solution MgSO_4 .
- ◆ Le BOV 10% et le BOV 20% ont également marqué de meilleures performances envers l'attaque de l'eau de mer par rapport aux autres bétons à 360 jours d'immersion.
- ◆ L'incorporation de la vase calcinée dans les bétons a amélioré la résistivité de ces bétons envers l'attaque de l'acide H_2SO_4 . Il n'y a pas eu une grande différence dans la dégradation des bétons de 20 et 10% de vase. Quant au béton témoin il a été le moins dégradé.
- ◆ La présence de la vase dans la pâte des bétons a réduit sensiblement le risque de carbonatation de ces bétons.
- ◆ Par comparaison entre les résultats des différents bétons, la valeur des coefficients de sorptivité a baissé avec l'ajout de la vase calcinée.
- ◆ Les bétons contenant la vase ont eu une porosité plus faible par rapport aux autres bétons.

CHAPITRE IV : RESUME DE LA RECHERCHE DE BELGUESMIA K. [25]

IV.1 INTRODUCTION

Cette étude avait pour objectif d'enrichir et approfondir les recherches entamées sur la vase, elle a consisté en la caractérisation de la vase extraite de barrage Chorfa vis-à-vis de la pouzzolanicité en vue d'optimiser les pourcentages de sa substitution partielle au ciment dans la formulation de béton autoplaçant à performances répondant aux normes en vigueur. Ce travail a contribué à valoriser la vase et donc encourager son utilisation à des fins d'exploitation comme matériau noble entrant dans la composition du béton autoplaçant.

IV.2 LES FORMULATIONS ETUDIEES

Des formulations de BAP à base des pourcentages de substitution en vase calcinée ; en l'occurrence 10, 20 et 30% ; ont été élaborées et un BAP témoin pour le besoin de comparaison, le tableau III.1 donne les compositions des différents bétons étudiés. Tous les essais réalisés dans cette étude sont présentés selon les normes en vigueur. Les essais en question touchent la caractérisation des BAP à l'état frais et à l'état durci et par rapport aux indicateurs de durabilité en l'occurrence les porosités à l'eau et au mercure.

Tableau IV.1 : Compositions des quatre BAP.

Constituants Kg/m ³	Les BAPS			
	BAP -T	BAP-V 10%	BAP-V 20%	BAP-V 30%
Ciment	450	402	380	315
Eau	225	218,5	220	210
E/C	0,5	0,54	0,57	0,66
Superplastifiant	3,0	3,65	5,2	7,5
Vase calcinée	/	38,5	67	115
Gravier 3/8	330	330	330	330
Gravier 8/15	495	495	495	495
Sable de mer	245	245	245	245
Sable de carrière	570	570	570	570

Les différentes caractéristiques des quatre BAP sont illustrées dans le tableau II.2

Tableau IV.2 : Caractéristiques générales des quatre BAP.

Caractéristiques	BAP-T	BAP-V 10	BAP-V 20	BAP-V 30
E /L	0,5	0,5	0,5	0,5
Ajout/Ciment (%) En volume	0	10	20	30
Sp/Liant (%)	0,7	0.9	1,3	1.9
Volume de pâte (l/m³)	375	375	375	375
Rapport G/S	1,01	1,01	1,01	1,01
SC /sable (%)	30	30	30	30
G (3/8) / gravillon (%)	40	40	40	40
Volume de squelette granulaire (l/m³)	625	625	625	625
Masse volumique théorique (Kg/m³)	2314,44	2307,4	2306,66	2306,26

Les formulations ont principalement le même volume de pâte (eau efficace + air occlus + ciment + additions + adjuvant + fines des granulats de dimension inférieure à 80 µm) qui est de 375 l/m³, le même rapport E/L = 0,5 et le même squelette granulaire avec un rapport G/S Proche de 1.

IV.3 RESULTATS DE LA RECHERCHE

IV.3.1 Etude à l'état frais

Afin de valider les formulations de BAP, il faut que ces dernières possèdent les qualités préconisées pour ce type de béton, à savoir : la fluidité, la stabilité, l'aptitude au remplissage, la résistance à la ségrégation et la résistance au ressuage.

L'ensemble des résultats de la caractérisation à l'état frais sont regroupés dans le tableau IV.3

Tableau IV.3 : récapitulatif des résultats de caractérisation à l'état frais.

Essai	Béton	BAP-T	BAP-V 10%	BAP-V 20%	BAP-V 30%
Étalement	Ø (cm)	69	68	66	64
	T ₅₀ (s)	2,8	2,8	2,64	3,08
La boîte en L	H ₂ /H ₁ %	93	92,6	89	89
	T ₂₀ (s)	1,25	1	1,5	1,3
	T ₄₀ (s)	2,5	2.1	2,8	2,48
Stabilité au tamis	%	6,15	5,8	5.2	5.1
Essai de J-Ring	Ø (cm)	62	59	58	57
	2h _r -h _m (mm)	8.9	8.1	7.5	7
Essai de ressuage	‰	1,1	1,66	1,02	0,96

Les 4 BAP ont vérifié l'ensemble des recommandations de l'AFGC [20] et donc ont été qualifiés de bétons autoplaçants sachant que les BAP à base de vase ont nécessité un dosage plus important en superplastifiant qui est directement proportionnel au pourcentage de substitution, et ce à cause de la grande finesse de la vase comparée à celle du ciment et éventuellement à cause de la structure poreuse des grains et donc à l'absorption d'eau qui en résulte si l'on se réfère la famille des ajouts minéraux tels que les laitiers et la fumée de silice et qui ont une demande en eau importante par rapport à celle du ciment, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité des BAP. C'est pour ces mêmes raisons que le plus grand taux de substitution dans cette étude s'est limité à 30%.

IV.3.2 Résistances à la compression

Les résistances mécaniques à la compression ont été mesurées à différentes échéances allant de 3 à 360 jours sur des éprouvettes cubiques de dimension (10x10x10) cm³

Les résultats sont présentés sous forme de graphique (Figure IV.1)

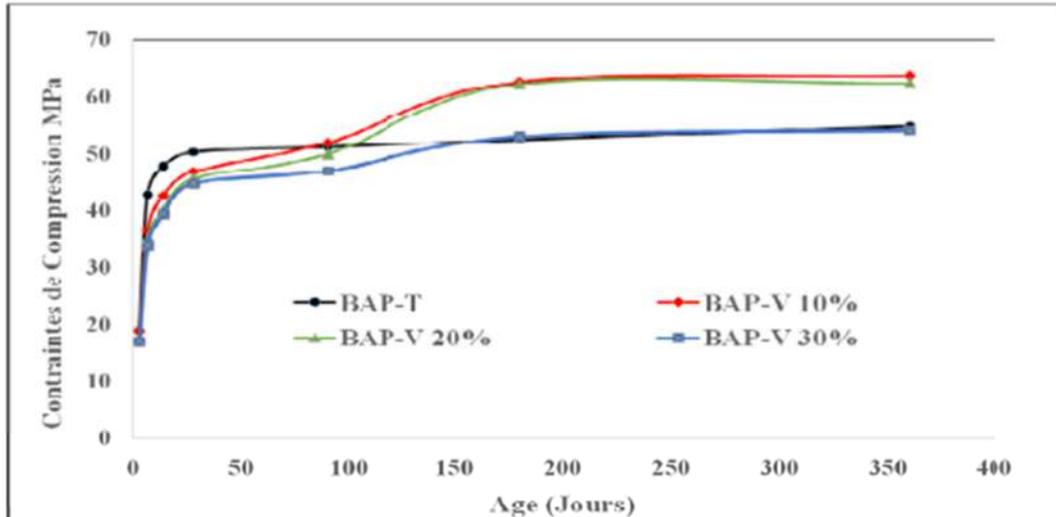


Figure IV.1 : Courbes d'évolution des résistances à la compression des BAP.

Les résultats ont montré que les résistances enregistrées pour l'ensemble des BAP a suivi la même cinétique avec un léger avantage pour le BAP témoin avant l'âge de 90 jours, cela peut s'expliquer par le phénomène de dilution causé par le remplacement partiel du ciment, où plus le taux de substitution est important, moins sont les hydrates formées.

Au-delà de 90 jours les deux BAP, à base de 10 et 20% de vase calcinée respectivement, se sont distingués en développant des résistances à la compression relativement supérieure à celles des deux autres BAP. Cela peut être expliqué par l'effet pouzzolanique du métakaolin issu de la calcination [26] qui est qualifié dans certains cas comme étant une réaction tardive qui se manifeste au-delà de 90 jours. Le BAP à base de 30% de vase calcinée affiche des résistances similaires à celle du BAP de référence mais légèrement inférieures à celles des BAP à base de 10 et 20 % de vase calcinée,

IV.3.3 Le retrait

Il a été question d'évaluer les variations dimensionnelles dues au retrait total sur les éprouvettes de BAP et de mesurer à différents temps t , la variation de longueur des éprouvettes (7x7x28) cm³, par rapport à leurs longueurs initiales à un temps t_0 pris pour origine (Figure IV.2).

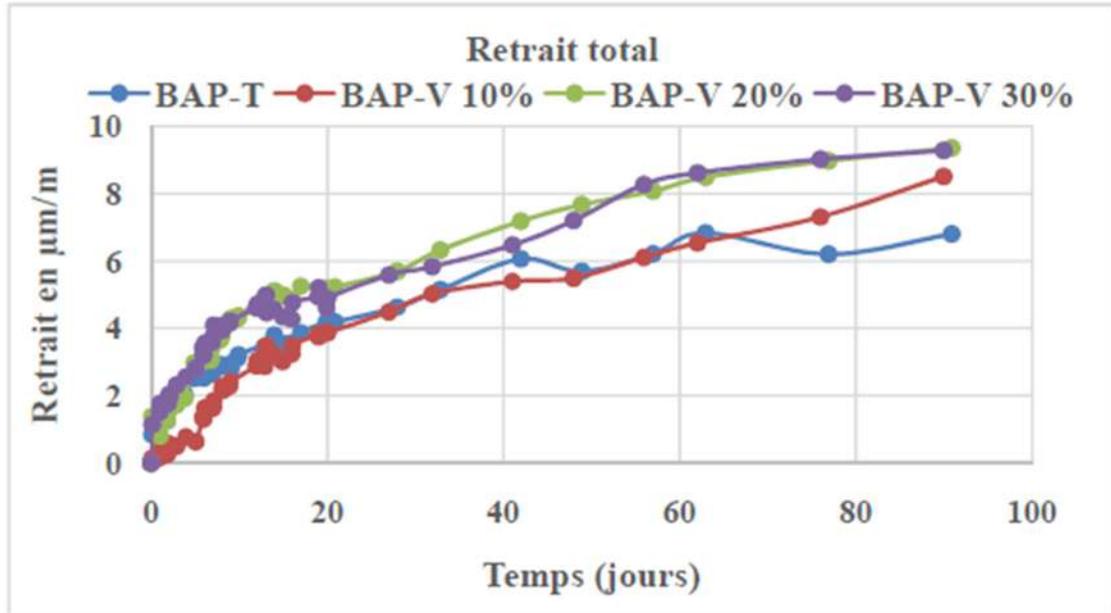


Figure IV.2: Retrait total des quatre BAP en fonction du temps.

Le retrait total a évolué très rapidement pour tous les types d'éprouvettes conservées à l'air libre, à cause de la taille de ces dernières qui rend la dessiccation plus favorable. Au jeune âge le retrait a été presque indépendant de la composition du BAP, l'effet de l'ajout ne s'est manifesté qu'après la première semaine avec une légère supériorité pour les BAP de 20% et 30% de vase.

Si l'on considère le fait que les mesure se font à l'échelle du micromètre alors il est plus facile de dire que même à moyen et long terme la composition des BAP étudiés n'a pas eu d'influence considérable sur le retrait total.

IV.3.4 Durabilité

La porosité accessible à l'eau des différents BAP étudiés a été déterminée par des mesures effectuées sur des disques de BAP (ép= 5cm et Diamètre= 11 cm) à l'âge de 90 jours dans le but d'étudier l'influence de l'incorporation de la vase calcinée et ses taux de substitution sur la porosité et par conséquent sur la durabilité des BAP de cette étude.

L'évolution de la porosité accessible à l'eau des BAP à 90 jours est illustrée dans la figure IV.3

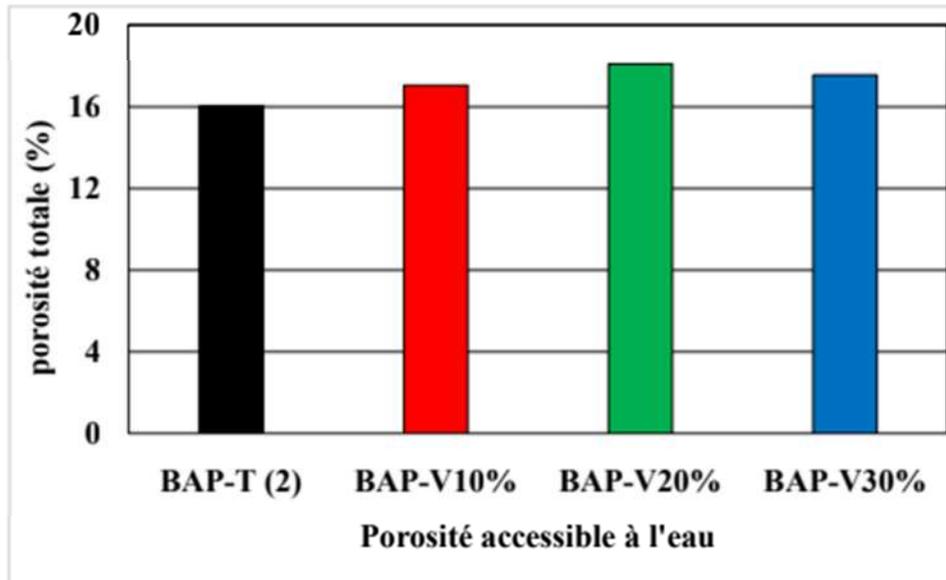


Figure IV.3 : Porosité accessible à l'eau des quatre BAP en fonction du temps.

La substitution du ciment par la vase calcinée a fait augmenter la porosité totale. Ce phénomène peut s'expliquer par la morphologie des grains de vase calcinée qui semblent avoir une surface rugueuse et donc une structure poreuse, et éventuellement à la faible densité des C-S-H résultant de la réaction pouzzolanique comparée à celle des C-S-H issues de l'hydratation du ciment [27].

Les figures IV.4 et IV.5 représentent respectivement les courbes des volumes cumulés des pores (intrusion et extrusion) et la distribution porale sous forme de logarithme différentiel de l'intrusion du mercure pour les 4 BAP d'étude.

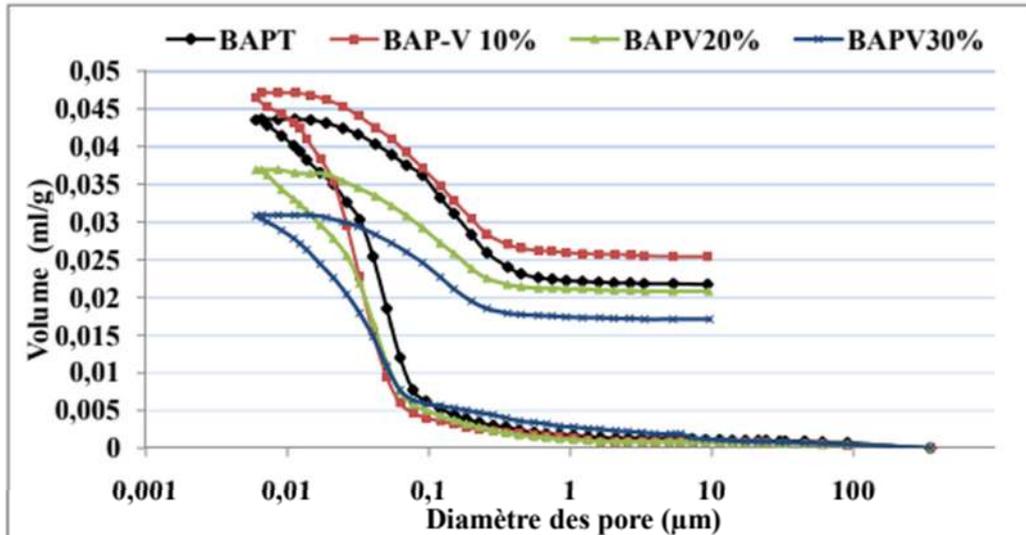


Figure VI.4 : Volume cumulé des pores des quatre BAP

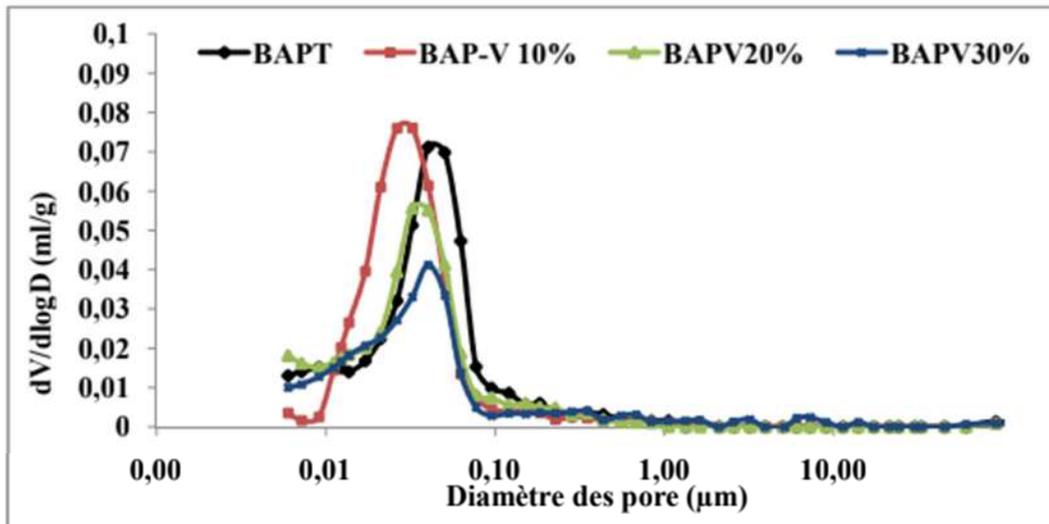


Figure IV.5 : Distribution porale des quatre BAP.

L'ensemble des BAP à base de vase calcinée ont présenté une porosité légèrement plus fine que celle du témoin mais le volume des pores a différé d'un BAP à l'autre, cela pourrait être expliqué par le fort dosage en superplastifiant dans les BAP à base de sédiment comme l'a montrée une étude de Khatib [28] menée sur l'influence des superplastifiants sur la porosité et la structure poreuse des pâtes de ciment.

IV.5 CONCLUSION

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

A l'état durci, les valeurs des résistances en compression à 28 jours ont été très proches avec une légère supériorité pour le BAP-T, mais elles ont convergé pratiquement après l'âge de 60 jours pour le BAP-V 10%, cependant, au-delà de 90 jours les BAP-V 10% et BAP-V 20 % ont affichés des résultats nettement meilleurs par rapport au témoin, ceci a été dû à la réaction pouzzolanique tardive à l'instar de nombreuses additions minérales telles que la pouzzolane naturelle et le métakaolin. Les BAP présentent des retraits totaux très proches.

A travers la mesure des paramètres caractérisant les propriétés de transfert, à savoir : porosité totale et porosité capillaire, des performances très comparables, voire meilleures pour les BAP à base de certains pourcentages de substitution en vase calcinée, ont été notées face au BAP témoin.

CHAPITRE V : RESUME DE LA RECHERCHE DE TAIEB F. [29]

V.1 INTRODUCTION

Cette étude consiste à valoriser la vase calcinée dans les mortiers de béton autoplaçant équivalent (MBAPE) répondant aux normes en vigueur en vue de diminuer leur retrait. Le but est d'encourager son utilisation à des fins d'exploitation comme matériau de construction à part entière.

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.

V.2 LES FORMULATIONS ETUDIEES

Différents protocoles expérimentaux ont été mis en œuvre lors de cette recherche. Cette campagne expérimentale avait pour but l'étude du retrait total et de la fissuration due au retrait empêché des mortiers autoplaçants à base de sédiments traités par calcination issus du barrage de Chorfa comparé à celui des mortiers contenant des cendres volantes provenant de la Centrale Thermique EDF de Cordemais en France. Quelques indicateurs de durabilité tels que l'absorption capillaire et la porosité ouverte ont été analysés.

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 [30]

Le tableau V.1 présente les compositions des MBAPE.

Tableau V.1 Compositions 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

V.3 RESULTATS DE LA RECHERCHE

V.3.1 Etude à l'état frais

Afin de valider les formulations de MBAPE, il a fallu que ces dernières possèdent les qualités préconisées pour ce type de mortier.

Les résultats des essais d'étalement des mortiers de béton autoplaçant équivalent sont donnés dans le tableau V.2

Tableau V.2. Récapitulatif des résultats d'étalement des MBAPE étudiés

MBAPE	MBAPET 0.39	MBAPEVC 0.39	MBAPECV 0.39	MBAPET 0.47	MBAPEVC 0.47	MBAPECV 0.47
Etalement 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 [29] (en évitant la ségrégation et le ressuage) qui a été acquis en ajustant l'usage de l'adjuvant utilisé [30]. Les MBAPE ont présenté des valeurs satisfaisantes et rapprochées comprise entre 19.25 et 20 cm.

Les résultats des essais du temps de prise des MBAPE étudiés sont donnés dans le tableau V.3

Tableau V. 3. Récapitulatif des résultats de temps de prise des MBAPE étudiés

MBAPE	MBAPE0.39	MBAPEVC0.39	MBAPECV0.39	MBAPE0.47	MBAPEVC0.47	MBAPECV0.47
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 V.2.

Avec le rapport $E/L=0.39$, le mortier à base des cendres volantes a eu un effet très significatif sur le temps de prise par rapport à celui du mortier de référence. Cependant, les temps de début et de fin de prise du MBAPE contenant la vase calcinée ont diminué par rapport à celui du mortier de référence. Cela s'est expliqué par le fait que la cinétique d'hydratation a été accélérée.

Le remplacement du ciment portland par les cendres volantes a impliqué 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 [33]. Quant au rapport $E/L=0.47$, il a été 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 MBAPE0.47 avec un écart maximal de 25 minutes.

V.3.2 Résistances mécaniques en compression

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du mortier et l'un des paramètres fondamentaux de cette étude, sa détermination a été 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 cette 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. L'évolution de la résistance en compression en fonction du temps est donnée par la figure V.1

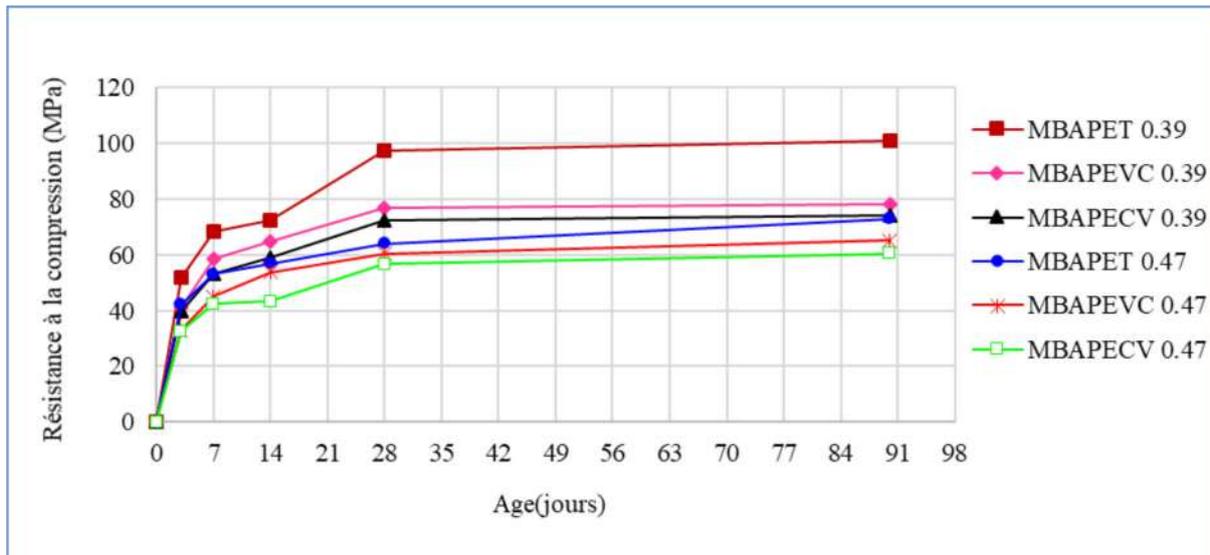


Figure V.1. Évolution des résistances à la compression en fonction du temps

Le MBAPE avec les deux rapports $E/L = 0.39$ et 0.47 a affiché de bonnes performances mécaniques par rapport aux MBAPEVC et MBAPEVCV.

Selon la nature de l'addition, le MBAPEVC a développé de meilleures résistances par rapport au MBAPEVCV, cela peut être expliqué également par la propriété latente de l'hydratation des ciments contenant des cendres volantes [32]. 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 [4].

V.3.3. Effet des additions minérales sur le retrait total et la perte de masse

La figure V.2 montre les retraits totaux des MBAPE des deux rapports E/l=0.39 et 0.47. Il a été noté une différence pour le rapport E/L=0.47, le MBAPET 0.47 et MBAPEVC 0.47 ont présenté 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

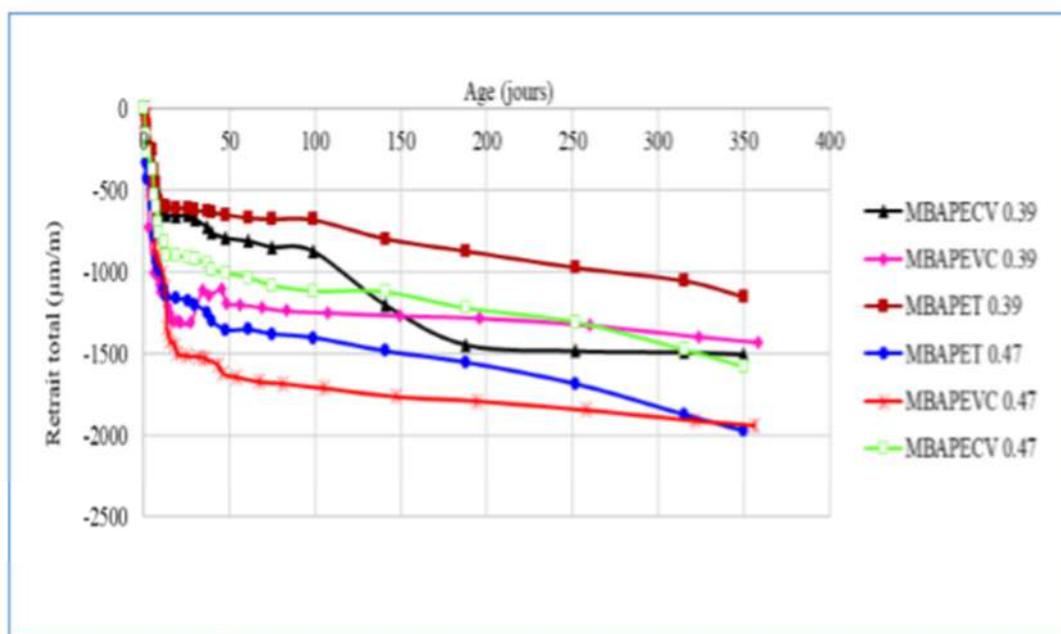


Figure V.2. Évolution de retrait total des MBAPE avec les deux rapports E/L

Les résultats de la figure V.3 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 a augmenté avec le rapport E/L et ce en raison de la teneur élevée en eau qui a créé 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.

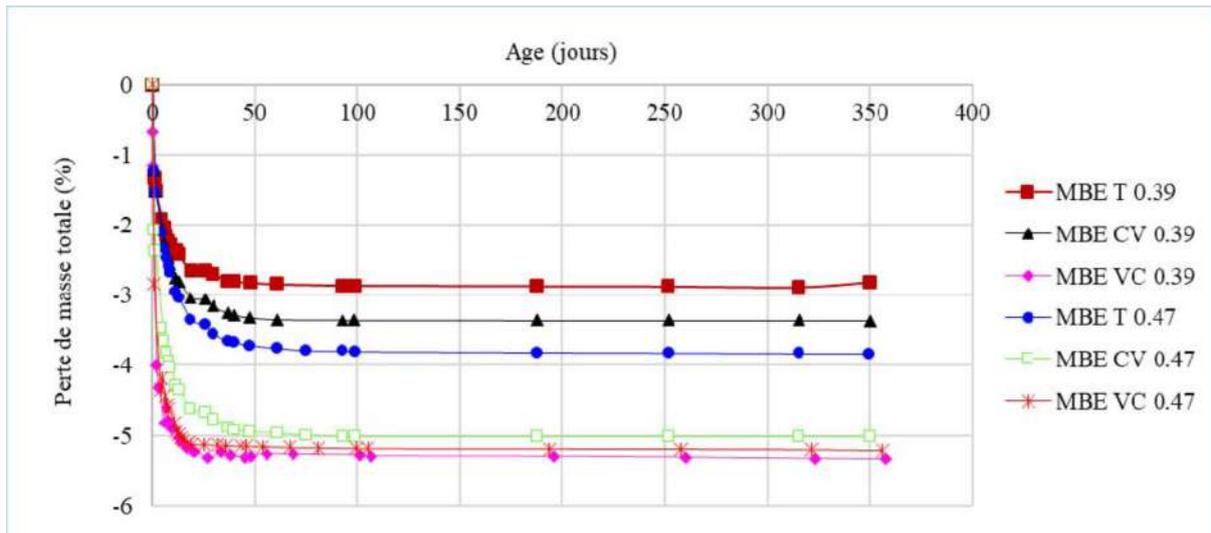


Figure V.3. Évolution de la perte de masse totale des MBEPE en fonction de temps avec les deux rapports E/L

V.3.4 Indicateurs de la durabilité

V.3.4.1 Porosité accessible à l'eau

La connaissance de la porosité du mortier s'est avérée utile pour pouvoir juger les différences relatives de la porosité des formulations de MBEPE qui ont été susceptibles d'expliquer les caractéristiques mécaniques et 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.

Les valeurs moyennes de la porosité accessible à l'eau mesurées après 28 jours de cure, sont présentées sur la figure V.4

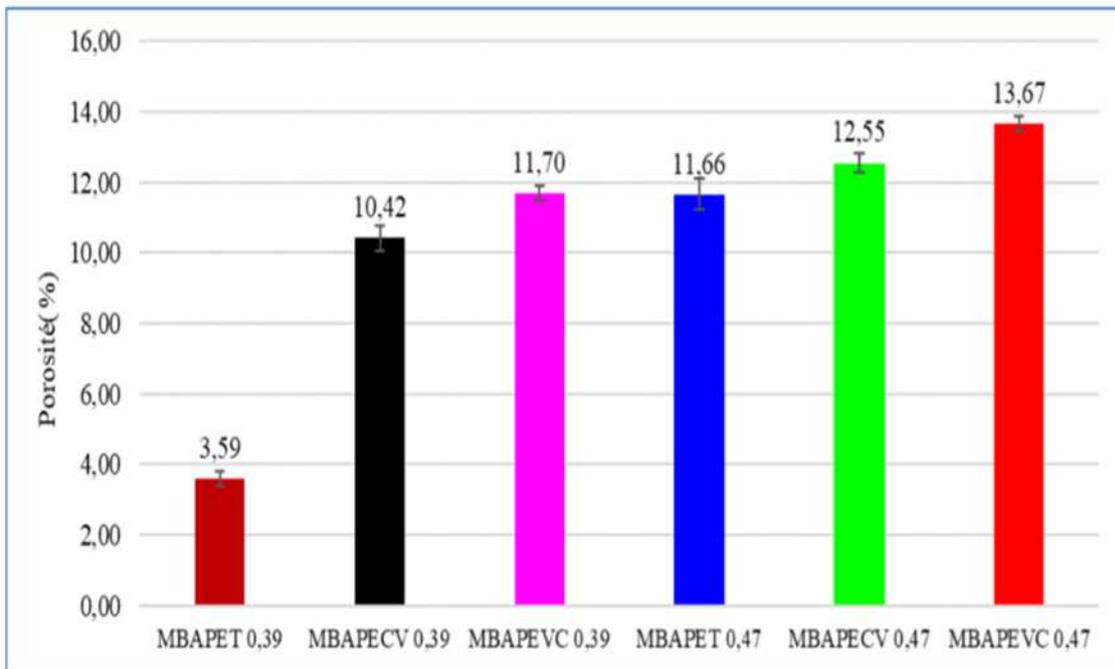


Figure V.4. Porosité accessible à l'eau des différents mortiers d'étude, essai réalisé après 28 jours de cure.

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 [31], et également la porosité peut être affectée par l'inclusion d'une addition minérale [32].

Sur la figure III.4 il a été constaté que pour le rapport E/L = 0.39, 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 [34]. Elle a été relativement équivalente (voisine) en termes d'amplitude entre les deux mortiers MBAPEVC0.39 et MBAPECV0.39. Ceci indique que l'incorporation des ajouts a augmenté considérablement la porosité totale du mortier. Ce phénomène est dû à la morphologie des grains de vase et des cendres volantes.

V.3.4.2 L'absorption capillaire

Le terme sportivité 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.

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 V.5

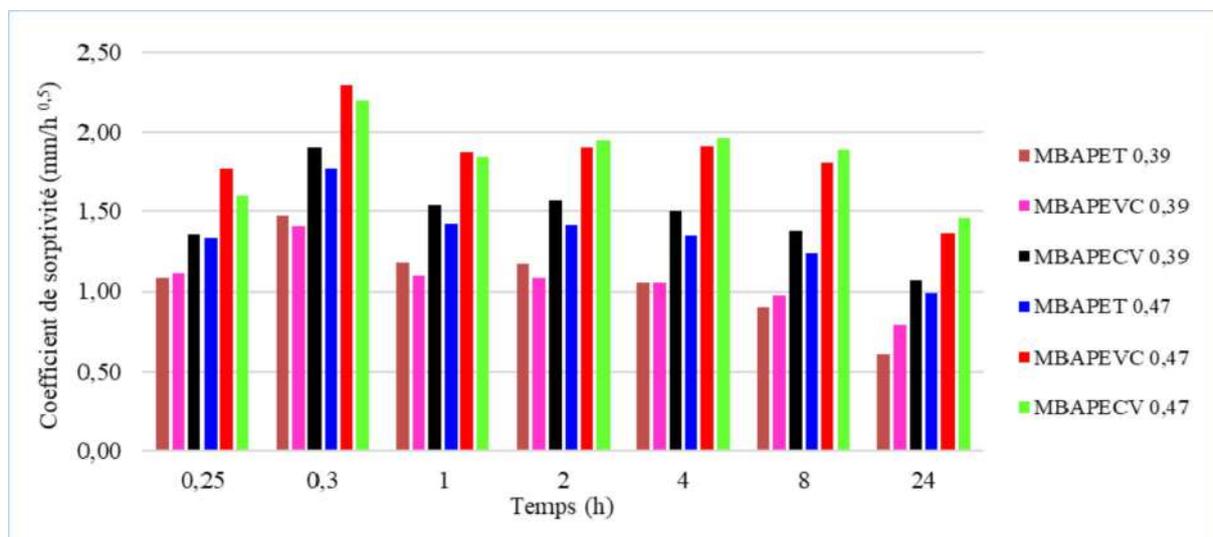


Figure V.5. Coefficients de sorptivité des différents mortiers d'étude, essai réalisé après 28 jours de conservation.

Le coefficient de sorptivité a augmenté avec l'augmentation du rapport E/L. La comparaison entre les différentes formulations du MBAPE de même rapport E/L a montré 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 ont confirmé que l'incorporation de la vase calcinée a eu 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 a été systématiquement inférieur par rapport à celui des formulations du MBAPECV.

V.4. INITIATION ET DÉVELOPPEMENT DE FISSURES PAR L'ESSAI DE RETRAIT EMPÊCHÉ

Dans l'étude de la tendance à la fissuration au jeune âge des mortiers autoplaçants, des essais de retrait empêché en utilisant à l'anneau selon la norme ASTM C.1581 [35] ont été menés, 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'ouverture des fissures dues au retrait empêché a été déterminée par un capteur de fissure.

La figure V.6 présente l'évolution des largeurs des fissures des MBAPE avec le rapport E/L= 0.47.

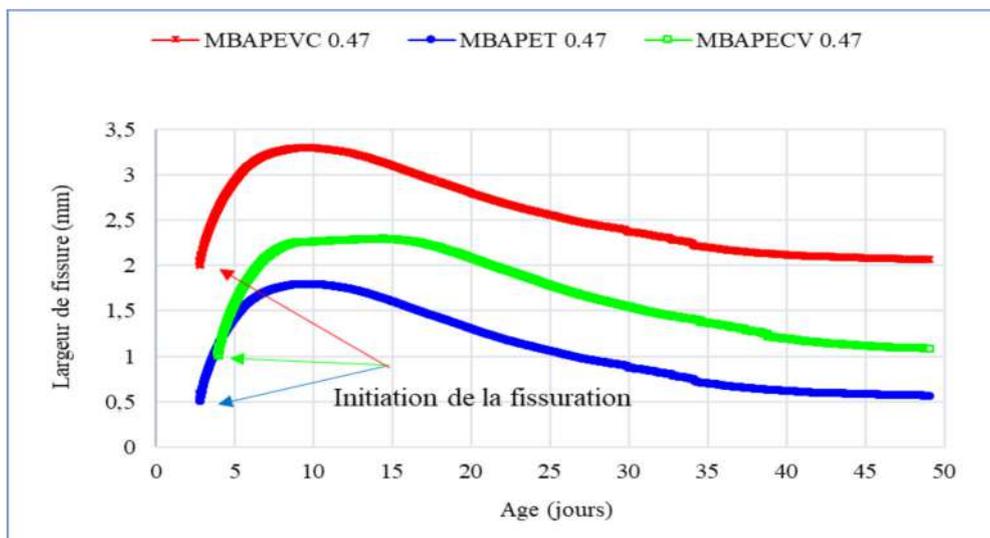


Figure V.6. Mesure des largeurs des fissures par le capteur de fissure.

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 [36].

Lors du suivi du retrait empêché à l'anneau en condition de séchage, le MBAPE VC 0.47 et le MBAPE T 0.47 ont fissuré plus tôt comme le montre la figure V.6, d'abord le MBAPE VC 0.47 ensuite le MBAPE T 0.47, suivi par le MBAPE CV 0.47.

Les résultats ont clairement montré 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 [37]. 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 [39].

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 ont été plus petites que celle des MBAPE avec des ajouts minéraux. Cette réduction a pu 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].

V.5 CONCLUSION

La recherche de TAIEB [29] a confirmé à travers ses résultats que 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.

Les écarts remarquables dans l'étude du retrait libre 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.

Les résultats de l'étude de la porosité ouverte et de l'absorption capillaire des 6 MBAPE ont corroborés ceux des résistances mécaniques car l'incorporation de la vase calcinée dans les MBAPE a eu un effet très bénéfique sur ces paramètres de transfert.

Les différents résultats ainsi obtenus ont permis de préconiser l'utilisation des sédiments traités du barrage de Chorfa II en substitution partielle du ciment Portland afin d'améliorer les propriétés de transport et de réduire le retrait même si l'effet des additions sur l'ouverture de la fissure est significatif. En plus de l'avantage économique, l'incorporation de ce déchet naturel dans les MBAPE a présenté, en général, des performances très comparables, voire meilleures (comme pour la résistance à la compression), par rapport à l'utilisation des cendres volantes.

CHAPITRES VI : RESUME DE LA RECHERCHE DE HADJSADOK R. [40]

VI.1 INTRODUCTION

Les recherches précédentes se sont portées sur la valorisation des sédiments issus du dragage des barrages. Elles ont été menées dans le domaine de caractérisation physicochimique, mécanique et durabilité. Elles ont démontré la possibilité d'utiliser ces sédiments en tant que matière première dans le domaine de génie civil, et spécialement en substitution partielle au ciment. Les matériaux cimentaires à base de ces sédiments (pâtes, mortiers, bétons ordinaires ou bétons autoplaçants) permettront de consommer ces d'déblais de dragage, ainsi qu'une amélioration des performances et caractéristiques de ces types de matériaux.

Cette recherche s'est inscrite dans une longue étude portant sur le domaine de la valorisation des sédiments de dragage appuyée par une évaluation environnementale par l'analyse du cycle de vie (ACV) des sédiments de dragage. Pour faire face au problème d'envasement des barrages un procédé d'industrialisation a été proposé, permettant l'élaboration d'une vase calcinée issue des sédiments de dragage, la moins impactante sur l'environnement du point de vue consommation d'énergie et dégagement de gaz à effet de serre.

VI.2 PROGRAMME EXPERIMENTAL

Durant cette recherche une étude expérimentale a été menée pour optimiser et caractériser la réaction pouzzolanique d'un éco-mortier à base de substitution partielle des sédiments de dragage calcinés au ciment ; en caractérisant leurs performances physiques, chimiques, rhéologiques et mécaniques.

Ce travail avait pour objectif l'utilisation des pouzzolanes artificielles (sédiments de dragage calcinés du barrage de Chorfa (Mascara)) pour la confection des éco-mortiers. L'influence de la température de cure sur le comportement mécanique des différents types de mortiers à base de 0, 5, 15 et 25% de sédiments a été mise en évidence.

Les différents types de mortiers ont été portés à plusieurs températures de cure sèche 10, 20 et 40°C : avec des échéances allant de 3 à 180 jours.

Suite à cette étude, un modèle d'industrialisation des sédiments de dragage des barrages en Algérie a été proposé ainsi que l'évaluation environnementale de ce modèle à l'aide de l'ACV et une comparaison environnementale des matériaux

VI.2.1 Les formulations étudiées

Le tableau VI.1 présente les formulations des différents types des mortiers à base des sédiments calcinés.

Tableau VI.1 : Formulations des différents mortiers.

Mortiers	Massique (g)									
	Liants		Sable	Eau de gâchage	Eau BV40	BV40 Commercialisé	BV40 Extrait sec	Masse totale	E_{eff}/C	E_{eff}/L
	CEMI 42,5	SD								
SD0%	450	0	1350	225	0	0	0	2025	0,5	0,5
SD5%	427,5	22,5	1350	224,72	0,28	0,45	0,17	2025	0,53	0,5
SD15%	382,5	67,5	1350	223,75	1,25	2,03	0,78	2025	0,58	0,5
SD25%	337,5	112,5	1350	222,65	2,35	3,83	1,47	2025	0,66	0,5

VI.3 RESULTATS DE LA RECHERCHE

VI.3.1 A l'état frais

La figure VI.1 représente les résultats de l'essai de mesure des temps de début et de fin de prise selon la norme EN196-3 des pâtes avec un taux de substitution des sédiments de dragage calcinés à 0%, 5%, 15% et 25% par rapport au dosage en masse du ciment.

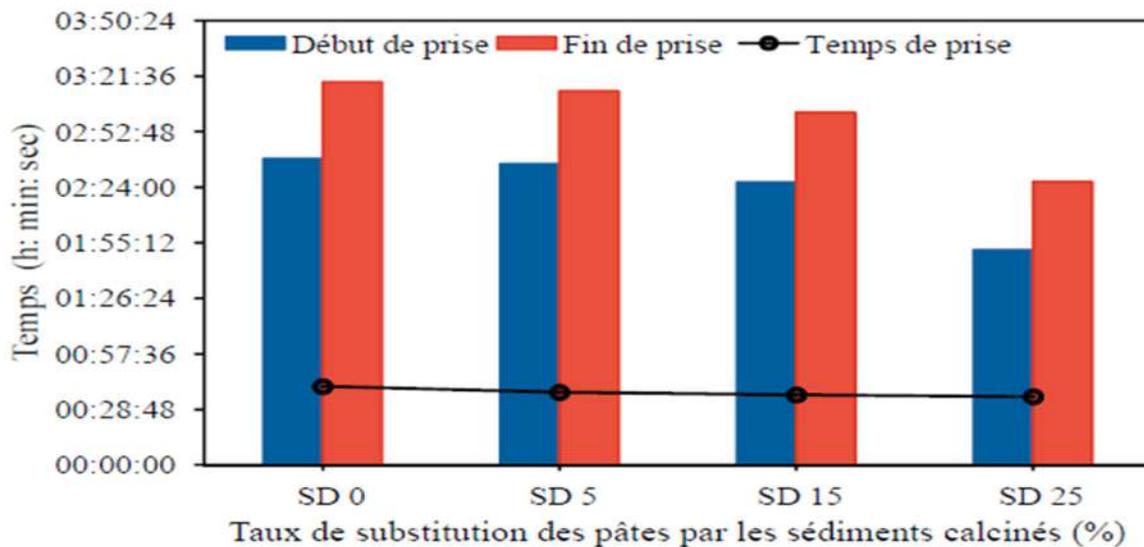


Figure VI.1 : Influence des dosages des sédiments calcinés sur le temps de prise.

La figure VI.1 montre que l'ajout des sédiments de dragage calcinés affecte légèrement les temps de début et de fin de prise selon le taux de substitution des sédiments de dragage par rapport au ciment.

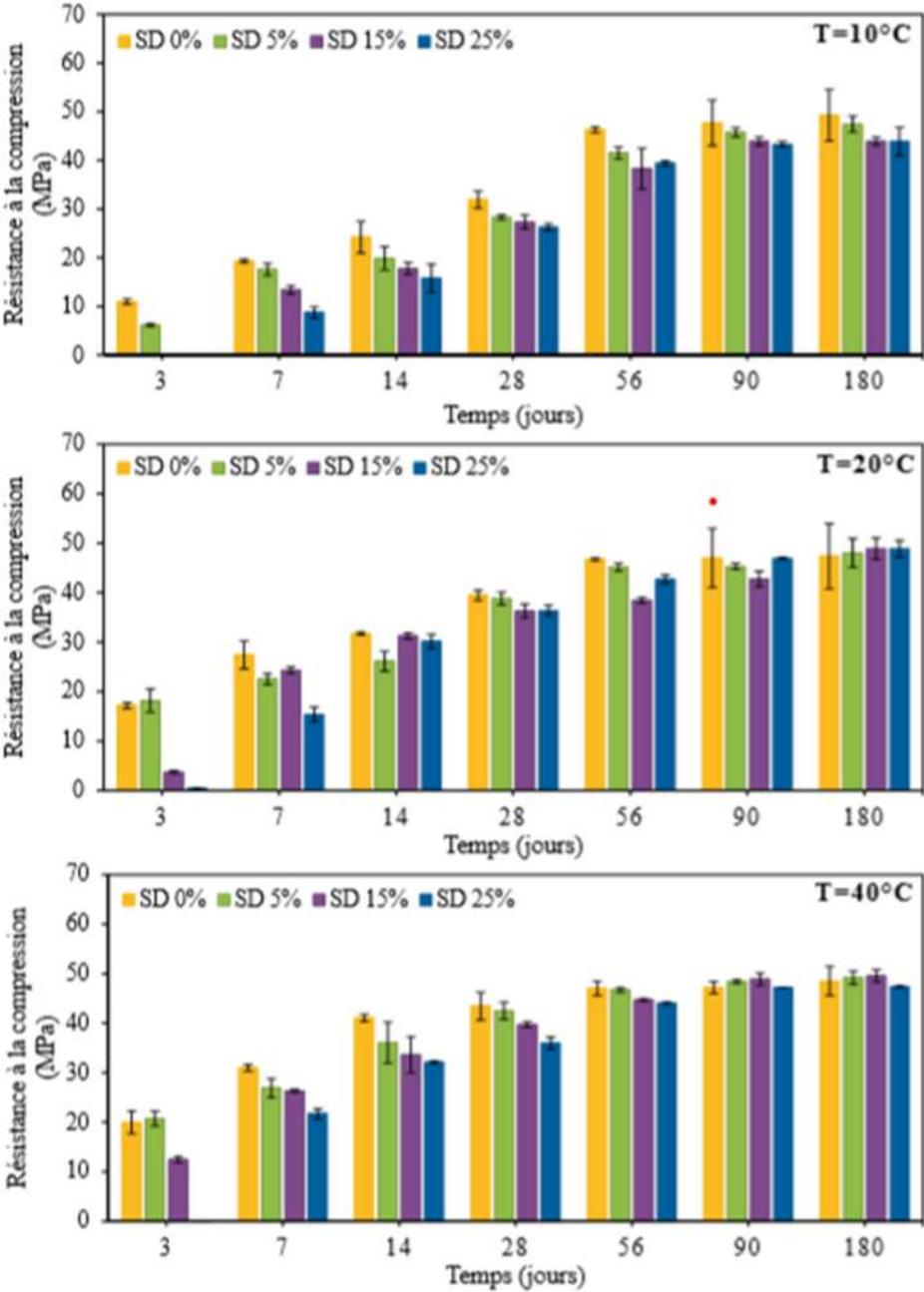
Le temps de prise des pâtes à base de substitution des sédiments de dragage est d'environ 37 min pour les différentes pâtes ce qui signifie que la substitution du ciment par les sédiments de dragage n'affecte pas le temps de prise jusqu'à un taux de 25% [41] ;[42].

VI.3.2 A L'état durci

La figure VI.2 montre l'évolution de la résistance en compression et le gain de résistance des mortiers à base de sédiments de dragage par rapport au mortier témoin à différentes températures 10°C, 20°C et 40°C.

Les résultats ont montré qu'après 3 jours l'incorporation des sédiments de dragage réduit significativement les résistances en compression des mortiers avec un taux de 15% et de 25%. Cela est dû principalement au dosage important du plastifiant BV40 pour garder la même maniabilité que le mortier témoin. Un retard de durcissement des mortiers à base de 25% de sédiments de dragage a été observé. A partir de 7 jours la plupart des mélanges des mortiers ont affiché une augmentation régulière de la résistance, confirmant ainsi une certaine activité des sédiments de dragage calcinés. La température de 10°C affecte négativement les résistances à la compression des différents mortiers. Avec des températures de 20°C et 40°C des améliorations des résultats des résistances mécaniques ont été constatés ; dues à

l'accélération du durcissement des différents mortiers. Les mortiers à base de sédiments donnent aussi des résultats très satisfaisants par rapport au mortier témoin.



Figures VI.2 : Evolution de la résistance en compression des mortiers à base de sédiments de dragage par rapport au mortier témoin à 10°C, 20°C et 40°C.

VI.3.3 Analyse du cycle de vie (ACV)

VI.3.3.1 L'ACV des sédiments de dragage calcinés

L'Analyse de cycle de vie (ACV) est la méthode la plus répandue pour l'évaluation des performances environnementales d'un produit, d'un service ou d'un système tout le long de son [43].

L'objectif de ce travail est de mettre en place un système à basse consommation d'énergie pour le traitement des sédiments de dragage calcinés, en prenant en considération les impacts sur l'environnement, tout le long du cycle de vie de ce processus : et de réduire les émissions des flux sortants vers l'atmosphère (rejets dans l'eau, l'air et le sol). A travers cette étude différents procédés, hypothèses et données utilisées dans la modélisation du processus de traitement des sédiments de dragage, ont été exposés. Cette modélisation permettra d'élaborer un outil d'aide à la décision pour le choix optimal d'élimination des sédiments de dragage.

L'objectif de ce travail a été l'application d'analyse du cycle de vie (ACV) des sédiments de dragage calcinés dans le domaine du bâtiment, avec un mortier où une partie du ciment sera substituée par des sédiments calcinés (figure VI.3).

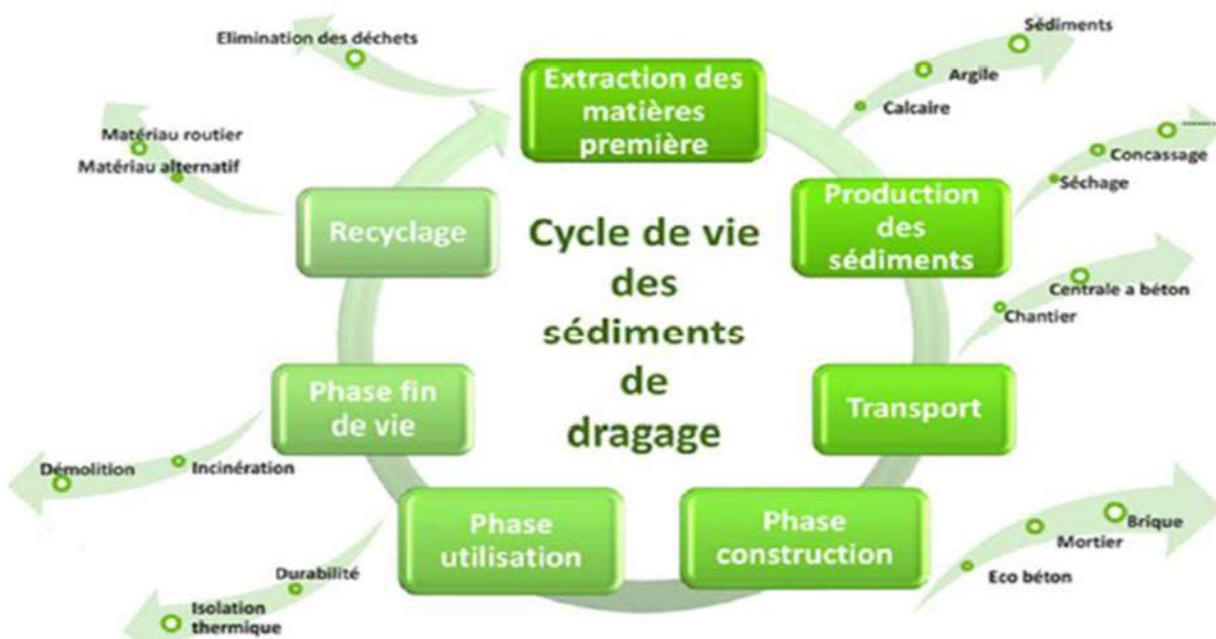
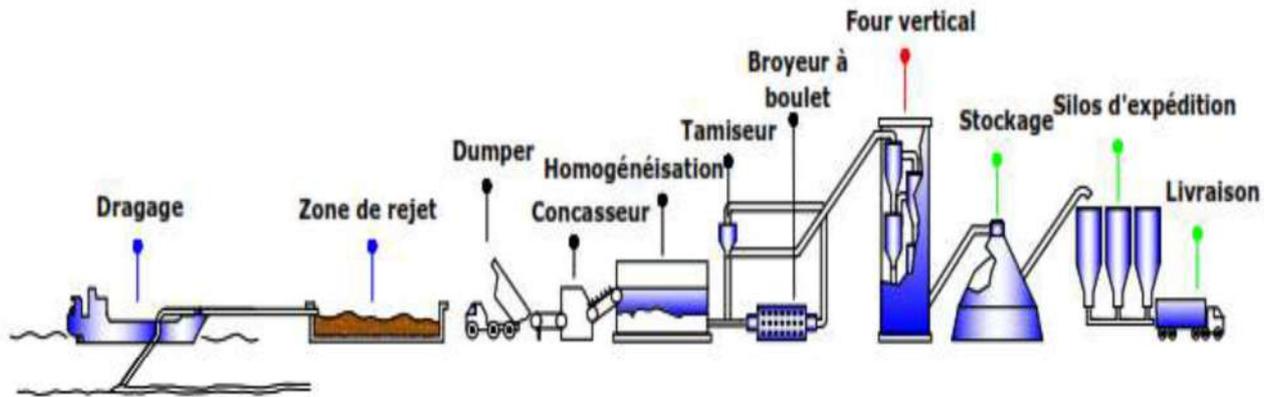


Figure 3. 1 : Cycle de vie des sédiments de dragage : cas d'application dans le bâtiment avec un béton et mortier, où une partie du ciment sera substituée par des sédiments de dragage.

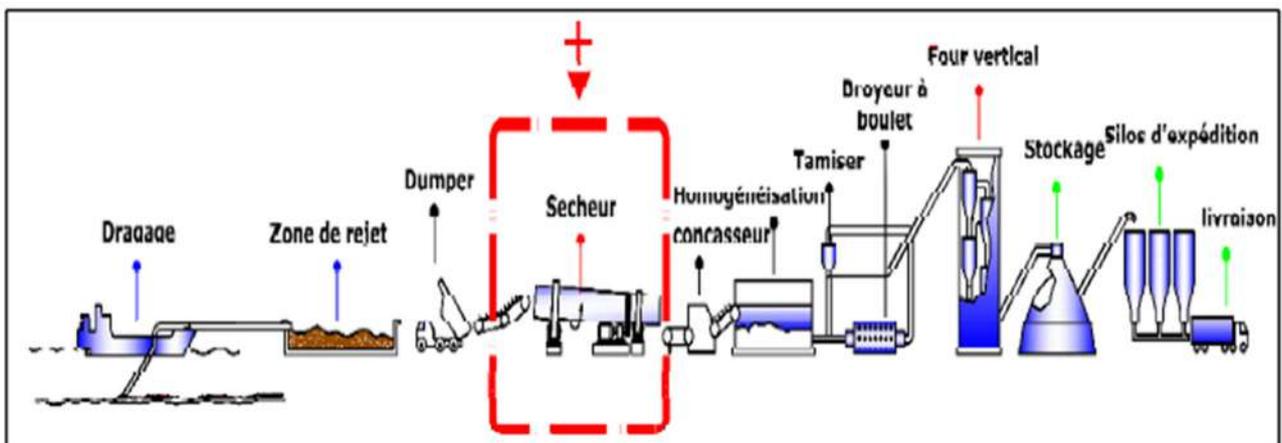
Deux scénarios industriels ont été envisageables pour le traitement des sédiments, afin de les valoriser comme matière première dans la substitution du ciment.

- Scénario 1 : Il a consisté à utiliser les sédiments après la décantation totale et le séchage



Figures VI.4 : Processus de traitement des sédiments de dragage calcinés scenario envisagé N°1.

- Scénario N 2 : les sédiments sont exploités après dragage dans les zones de rejets ou au niveau des conduites terrestres. Un sécheur permet de récupérer l'eau et les sédiments séchés, afin d'optimiser le temps de décantation à l'air libre (figure VI.5).

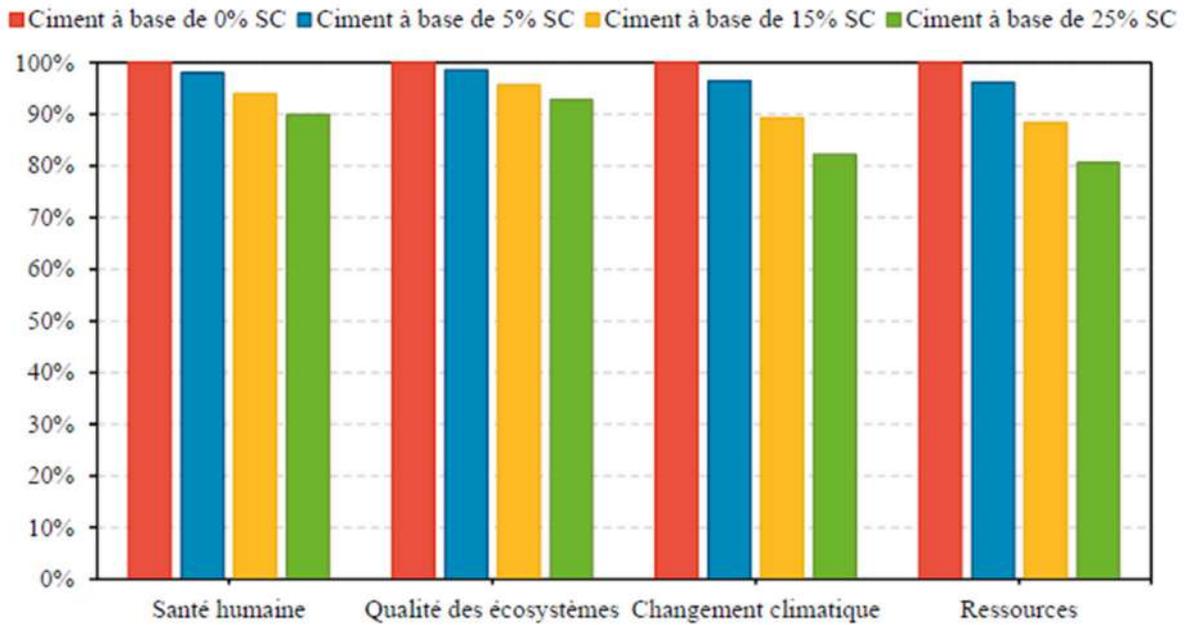


Figures VI.5 : Le processus de traitement des sédiments de dragage calcinés du scenario N°2.

Donc pour optimiser la consommation énergétique il faut utiliser les sédiments à l'état sec. D'où le choix du scénario N°1.

VI.3.3.2 Analyse du cycle de vie des ciments à base de sédiments calcinés

La comparaison des quatre ciments à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés a montré que les ciments avec un fort taux de substitution offrent les meilleures performances environnementales. Leurs scores sont inférieurs aux scores du ciment témoin dans les catégories santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources (figure VI.6).



Figures VI.6 : Comparaison des scores de dommages d'impacts d'une tonne de ciments à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés.

VI.3.3.4 Analyse du cycle de vie des pâtes et mortiers à base des sédiments calcinés

La figure VI.7 représente les résultats de comparaison des scores de dommages d'impacts des différentes pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés.

Les résultats ont montré que les pâtes avec un fort taux de substitution offrent les meilleures performances environnementales. Leurs scores sont inférieurs aux scores de la pâte témoin dans les catégories santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources. Le taux de 25% est le taux le plus avantageux sur le plan environnemental. Idem pour les mortiers (figure VI.8).

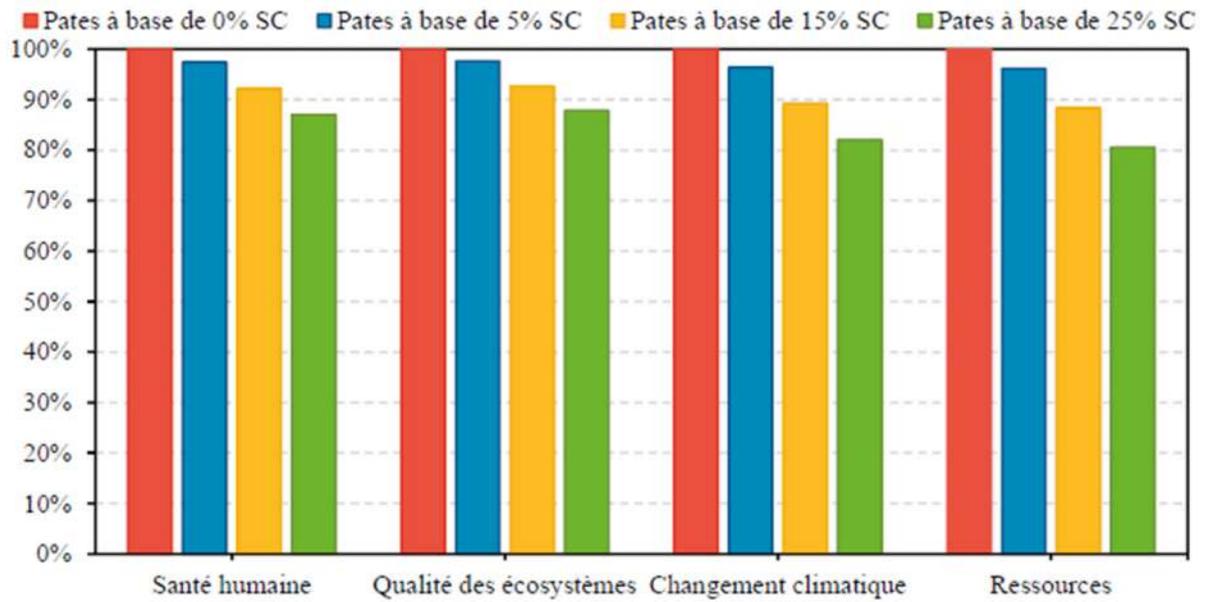
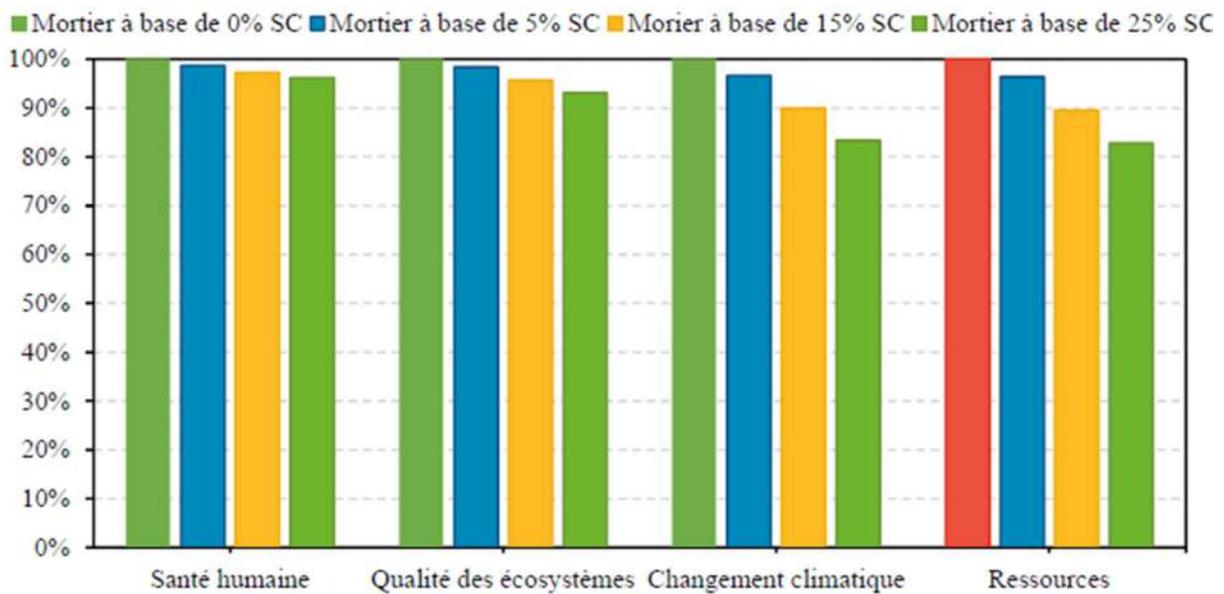


Figure VI.7 : Comparaison des scores de dommages d'impacts des pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% sédiments calcinés.



Figures VI.8 : Comparaison des scores de dommages d'impacts des mortiers à base de 0%, 5%, 15% et 25% sédiments calcinés.

VI.5 CONCLUSION

Cette recherche a mis le point sur l'intérêt de la valorisation des sédiments de dragage des barrages qui doit répondre à l'élimination des zones de rejet posant un problème important aux gestionnaires de l'ANBT pour la diminution des émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Les scénarios étudiés ont porté sur le développement d'un nouveau procédé de production des sédiments de dragage calcinés en Algérie selon deux variantes. Le scénario 1 consistait à utiliser les sédiments à l'état sec. Cette opération nécessite un temps de séchage à l'air libre assez important. Le scénario 2 a été réalisé sur des sédiments à l'état humide. Le temps de séchage est plus réduit. Le choix s'est porté sur le scénario 1, les impacts environnementaux ont été plus faibles ; d'où une nette amélioration sur les indicateurs environnementaux.

La meilleure manière d'exploitation des sédiments de dragage est une exploitation à l'état sec. L'installation d'une usine de transformation des sédiments de dragage peut être envisagée. L'exploitation après un séchage complet, permettra d'optimiser les impacts environnementaux.

L'évaluation environnementale du processus expérimentale a montré que les mortiers, les pâtes

Et les ciments avec un fort taux de substitution offrent les meilleures performances environnementales, sur les catégories santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources.

CONCLUSION GENERALE

De nombreux réservoirs destinés à l'irrigation et à l'alimentation en eau potable sont en cours de réalisation ou en projet. Malheureusement ces richesses se dégradent de jour en jour par la sédimentation accélérée. La lutte contre l'envasement, représente donc un enjeu considérable le barrage créant une retenue qui constitue une fosse à sédiments de grande taille ; ou au fil des années la décantation des dépôts réduira la capacité de stockage prévue d'où l'urgence de leur valorisation.

Les sédiments issus des barrages de Chorfa et Fergoug ont été concernés par cette valorisation et ont fait l'objet de plusieurs recherches menées par des doctorants au sein du département de Génie Civil de l'Université de Mostaganem de 2010 à 2019.

Les recherches ont confirmé à travers tous les résultats présentés dans ce travail, que la vase provenant de Chorfa et Fergoug peut être utilisée avec succès, comme addition minérale dans les formulations des mortiers et bétons ordinaires et autoplaçants affichant un comportement satisfaisant à l'état frais et durci.

En général, pour des taux de substitution de 10 à 25% de vase calcinée introduits dans les matériaux cimentaires, ces derniers montrent des performances mécaniques intéressantes à court et long terme ainsi que des déformations différées dues au retrait diminué.

L'incorporation de ce matériau naturel dans les bétons conduit en général à des performances très comparables, voire meilleures (comme pour les acides et les sulfates) à celles des bétons incorporant la pouzzolane naturelle. Par ailleurs une meilleure résistance envers l'attaque de l'eau de mer et du dioxyde de carbone (carbonatation) sur ces bétons a été notée.

En ce qui concerne les propriétés de transfert, les coefficients de sorptivité des mortiers ont baissé avec l'ajout de la vase calcinée. Également, les bétons contenant la vase ont une porosité plus faible par rapport aux autres bétons.

Les résultats de l'analyse du cycle de vie du processus de production des sédiments de dragage ont mis en évidence la possibilité de développer un processus qui respecte l'environnement. La meilleure manière d'exploitation des sédiments de dragage est une exploitation à l'état sec. L'installation d'une usine de transformation des sédiments de

dragage peut être envisagée. L'exploitation après un séchage complet, permettra d'optimiser les impacts environnementaux.

L'évaluation environnementale du processus expérimentale a montré que les mortiers, les pâtes et les ciments avec un fort taux de substitution offrent les meilleures performances environnementales, sur les catégories santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources.

La possibilité de valoriser la vase activée thermiquement dans le but d'en fabriquer un substitut aux liants hydrauliques d'usage courant est réalisable.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **BEAUCHAMP J.**, « Sédiments et roches sédimentaires, cours de sédimentologie », URL: <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours-sed/sed-1.htm> (accessed 2.6.19), 2005.
- [2] **MAES E.**, « L'eau et l'environnement aquatique, Chapitre 10 », [en ligne]. Disponible sur : <http://environnement.wallonie.be>.
- [3] **SHNEIDER G.**, « le curage des sédiments des cours d'eau ». Le courrier de l'Environnement de l'INRA, vol. 43, pp. 146-147, 2001
- [4] **BERTREAU I., MARTIN S., VASSILIADIS A.**, « Le curage des cours d'eau lorsque les sédiments contiennent des éléments-traces toxiques ». Le courrier de l'Environnement de l'INRA, vol. 20, pp.27-35, 1993
- [5] **AGENCE DE L'EAU (1).**, « Méthode de gestion et de réutilisation des sédiments pollués » Inventaire détaillé des techniques de curage, transport, traitement et usage des sédiments. [En ligne], 2002, 126 p. Disponible sur : <http://www.eau-artois-picardie.fr/>.
- [6] **CHIKOUCHE M., A.**, « Effet des ajouts à base d'argiles gréseuses et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaires », thèse présentée pour l'obtention du diplôme de magister spécialité : génie civil, option : matériaux, Université de M'sila, 2008.
- [7] **LUCAS, G., CROS, P., LANG, J.**, 1976. « Les roches sédimentaires, étude microscopique des roches meubles et consolidées ». 2ème édition, p 38, Paris, 1976.
- [8] **SCORDIA, P.-Y.**, « Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers », thèse présentée pour l'obtention du grade de docteur, l'Ecole Centrale de Lille, spécialité : génie civil, p 7-23, 2008.

[9] **BONNET C.**, « Développement de bio-essais sur sédiments et applications de l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés », thèse de l'Université de Metz, 2000.

[10] **ANBT**, « Agence Nationale des Barrages et Transferts », 2015

[11] **Géoportail** [www document], URL : <http://anbt-dz.com/index.php/reglementation>, (accessed 2.7.19).

[12] **REMINI, B., LEDUC, C., HALLOUCHE, W.**, « Evolution des grands barrages en régions arides : quelques exemples algériens. Sécheresse 20, 96–105. <https://doi.org/10.1684/sec.2009.0172>, 2009.

[13] **GOOGLE EARTH**, 2019.

[14] **REMINI, B.**, « L'envasement des barrages, quelques exemples algériens », <https://beep.ird.fr/collect/bre/index/assoc/20-165-1.dir/20-165-171.pdf>, 1996.

[15] **BESSEGHIER N.**, « Valorisation de la vase du barrage de Fergoug pour son utilisation dans le béton », Thèse de Magister, Université de Mostaganem, 2008.

[16] **SEMCHA A.**, « Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug », Thèse de doctorat à l'Université de Reims, 2006.

[17] **ANBT-MASCARA**, « Agence nationale des barrages et transferts », [2004-2005], [2007- 2011].

[18] **BELGUESMIA K.**, « Comportement vis-à-vis des attaques sulfatiques et de la carbonatation d'un béton autoplaçant à base de sédiment de dragage », Thèse de Magister, Université de Mostaganem, 2011.

[19] **BELARIBI O.** « Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane », Thèse de doctorat, Université de Mostaganem (2015).

[20] **AFGC** « Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants », (janvier 2008).

[21] **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 de Mostaganem (2017).

- [22] **BANTHIA N., BHARGAVA A.**, « Permeability of stressed concrete and role of fiber reinforcement ». *ACI Materials Journal*, vol. 104, n°1, 2007, 70–76.
- [23] **VAN GENUCHTEN M.T.**, « A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils ». *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44, 1980, pp. 892-898.
- [24] **MUALEM Y.**, « A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media ». *Water Resources Research*, vol. 12, 1976, pp. 513-522.
- [25] **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 de Mostaganem (2016.2018).
- [26] **SAMARA, M., ROZIÈRE, E, KHOKHAR, M, et al.** « Valorisation des sédiments traités dans le béton autoplaçant ». In : *XXVIèmes Rencontres universitaires de Génie Civil* ; 2008.
- [27] **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.
- [28] **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.
- [29] **TAIEB.F** « Contribution à l'Étude du Retrait des Mortiers de Béton Autoplaçant Équivalent à Base de Sédiments de Dragage », Thèse de doctorat, Université de Mostaganem (2019).
- [30] **MESBAH H.**, « Improvement of the behavior of mortars based on recycled aggregates by addition of fibers », PhD Thesis, University of Artois 1997.
- [31] **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.
- [32] **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.

- [33] **ACKER P.**, « Comportement mécanique du béton : apports de l'approche physicochimique ». Rapport de Recherche LPC, N°152, Juillet (1988), 122p.
- [34] **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).
- [35] **NEVILLE A.**, « Propriétés des bétons ». Centre de recherche international du béton éditions eyrolles. Traduction crib, Sherbrooke, Canada, 2000.
- [36] **MESBAH H.**, « Improvement of the behavior of mortars based on recycled aggregates by addition of fibers », PhD Thesis, University of Artois 1997.
- [37] **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>.
- [38] **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.
- [39] **GRZYBOWSKI M., SHAH S.P.**, « Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete ». *ACI. Mater. J.* 87(2), 138–148. Doi- 10.14359/1951, 1990.
- [40] **HADJ SADOK R.** « Analyse du cycle de vie des Sédiments de dragage » Thèse de doctorat, Université de Mostaganem, 2018.
- [41] **LAOUFI, L., SENHADJI, Y., BENAZZOUK, A.**, “Valorization of mud from Fergoug dam in manufacturing mortars. Case Stud”. *Constr. Mater.* 5, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.06.002>
- [42] **SAFER, O., BELAS, N., BELARIBI, O., BELGUESMIA, K., BOUHAMOU, N.-E., MEBROUKI, A.**, “Valorization of Dredged Sediments as a Component of Vibrated Concrete: Durability of These Concretes Against Sulfuric Acid Attack”. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 12, 44. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0270-7>, 2018.
- [43] **JOLLIET, O., SAADE, M., CRETZAZ, P.**, « Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan ». PPUR Presses polytechniques, 2010.