



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Abdelhamid Ibn Badis University of Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Science and Technology



N° de référence :/2022.

Thèse pour l'obtention du diplôme du doctorat LMD (Troisième cycle)

Durabilité des mortiers à base de déchets naturels

Présentée par :

BELGHIT Abdelkadir

Soutenu publiquement le : **15/12/2022.**

Devant le Jury composé de :

▪ Mme BELAS Nadia	Professeur	Présidente	U.M.A.B de Mostaganem
▪ Mr SEMCHA Abdelaziz	Professeur	Examineur	Université Ahmed Draia - Adrar
▪ Mr BENAÏSSA Abdelatif	Professeur	Examineur	U.S.T.O- MB d'Oran
▪ Mr SARDOU Miloud	M.C.A	Examineur	U.M.A.B de Mostaganem
▪ Mr BOUHAMOU Nasr-Eddine	Professeur	Directeur de Thèse	Centre Universitaire d'El Bayadh
▪ Mr HAMADACHE Miloud	M.C.A	Co-directeur de Thèse	Centre Universitaire de Relizane

Année Universitaire : 2022 / 2023

Résumé

Abdelkadir Belghit

abdelkadir.belghit.etu@univ-mosta.dz

ملخص

الأسمنت هو المادة الأكثر استخداماً من طرف البشر بعد الماء. أثناء إنتاجها يتعين على الأخصائيين في الميدان مواجهة عدة متطلبات وتحديات، وهي: خفض انبعاث ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، الحد من استهلاك الطاقة والبحث عن مواد ونفايات جديدة تسمح باستبدال المواد الطبيعية الغير المتجددة والتي تتجه نحو الاستنفاد. من أجل تحسين الوضع الاقتصادي الحساس للجزائر الذي يعتمد إلى حد كبير على عائدات النفط تطمح الدولة بشكل كبير إلى الاستثمار في القطاع الصناعي و من بين النشاطات الصناعية التي تعرف اهتماماً كبيراً شعبة إنتاج الأسمنت، حيث شهد هذا القطاع نشاطاً إنتاجياً كبيراً في العشرين عاماً الماضية كما عرف بدء عملية التصدير منذ عام 2018. في نفس الوقت، أحوال السدود هي عبارة عن نفايات قطاع الموارد المائية الناتجة عن الظواهر الطبيعية (الجفاف وانجراف التربة) والتي تنتقل فيما بعد بفعل مياه الأمطار إلى قاع الخزانات مما يقلل من كمية ونوعية مياه الشرب، تتواجد هذه الأحوال في الجزائر بكميات هائلة مع زيادة سنوية تبلغ حوالي 120 مليون متر مكعب بينما يحتاج سكان هذا البلد إلى المزيد من المياه.

تتميز أحوال السدود بعد المعالجة الحرارية بنشاط بوزولاني مرتفع بالإضافة إلى خصائص تقنية منافسة لخصائص البوزولان الطبيعي، وقد اقترح العديد من الباحثين الجزائريين هذه الأحوال للاستبدال الجزئي للأسمنت بمعدلات تصل إلى 30%. يهدف هذا العمل أساساً إلى مواصلة التحقيقات وإثراء المهارات المتعلقة باستخدام الأحوال المعالجة حرارياً للاستبدال الجزئي للأسمنت بطرق جديدة تسمح بسهولة دمجها في صناعة إنتاج الأسمنت.

ولتجسيد الأهداف المسطرة، تم تصنيع عشرة أنواع من الملاط، واحد للرقابة وتسعة تحتوي على أسمنت معدلة بمخاليط ثنائية وثلاثية بين الأسمنت، الوحل المعالج حرارياً والبوزولان الطبيعي. مع إجراء اختبارات لتقييم المعاجين والملاطات في الحالة السائلة (الاتساق القياسي، تحديد مدة التصلب)، اختبارات على الملاطات في الحالة الصلبة (قوة الضغط، امتصاص الماء، الكثافات الظاهرية)، اختبارات المتانة (تأثير حمض الكلوريدريك، تأثير كبريتات الصوديوم الداخلية مقاومة درجة الحرارة العالية) قياس النقل الحراري و الرؤية المجهرية للعينات. أثبتت نتائج التجارب أن التركيبات الثلاثية (الأسمنت + الوحل المعالج حرارياً + البوزولان الطبيعي) يمكن أن تسهل عملية دمج استعمال الأحوال المعالجة حرارياً في مصانع الأسمنت كخطوة أولى، استعمال هذه التركيبات سيساعد على ما يلي: تخفيض طفيف في الاستهلاك العالي للمياه عن طريق الخلط بين المادتين بدل استعمال الوحل المعالج حرارياً وحده؛ تحسن في قوة الضغط لا سيما على المدى الطويل، زيادة في مقاومة حمض الهيدروكلوريك، وانخفاض في النقل الحراري مقارنة بأسمنت بورتلاند، زيادة مقاومة الملاط لدرجات الحرارة المرتفعة، وفي النهاية اقترحت خلطات جديدة لتطوير خرسانة أو ملاط ذات الأداء العالي، و خلطات أخرى لإنتاج ملاط واستعماله لتكوين مواد بناء الغلاف الخارجي للمباني.

الكلمات المفتاحية: الملاط، الوحل المعالج حرارياً، البوزولان الطبيعي، المتانة، النقل الحراري.

Résumé

Le ciment est le matériau le plus utilisé par l'être humain après l'eau. Lors de sa production, les spécialistes du domaine devront faire face à plusieurs exigences et défis à savoir : réduire les dégagements de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, diminuer la consommation en énergie et chercher des nouveaux matériaux et déchets permettant le remplacement des matériaux naturels non renouvelables en voie d'épuisement. Pour améliorer la situation économique délicate d'Algérie dépendante dans sa grande partie à la rente pétrolière, l'État compte beaucoup sur l'investissement dans le secteur d'industrie telle que la production des ciments. Cette filière a connu dans les vingt dernières années une activité de production importante, le pays a même commencé les exportations des ciments depuis 2018. En parallèle, la vase des barrages est un déchet du secteur hydraulique résultant des phénomènes naturels (la sécheresse et l'érosion des bassins versants) qui est par la suite transportée par les eaux pluviales jusqu'au fond des réservoirs diminuant ainsi la quantité et la qualité de l'eau potable. Cette vase est disponible en quantités énormes avec une augmentation annuelle de l'ordre de 120 millions mètre cube alors que la population Algérienne a besoin plus d'eau.

La vase à l'état calcinée est caractérisée par une activité pouzzolanique élevée ainsi qu'une fiabilité technique concurrente à la pouzzolane naturelle. Cette vase a été proposée par plusieurs chercheurs Algériens pour la substitution partielle du ciment avec des taux allant jusqu'à 30 %. L'objectif principal de ce travail est de continuer les investigations et d'enrichir les compétences sur l'utilisation de la vase calcinée des barrages comme substituant partiel du ciment avec de nouvelles façons permettant son intégration facile dans l'industrie de production des ciments.

Pour la concrétisation des objectifs, dix mortiers dont un témoin et neuf contenant des ciments modifiés avec des mélanges binaires et ternaires entre le ciment, la vase calcinée et la pouzzolane naturelle ont été confectionnés. Des essais d'évaluation des pâtes et mortiers ont eu lieu à l'état frais (Consistance normalisée, Temps de prise et Maniabilité), à l'état durci (Compression, Absorption d'eau, Densités apparentes), des essais de durabilité (Attaque à l'acide chlorhydrique, Attaque interne des sulfates de sodium, Résistance aux hautes températures), des essais de mesure de conductivité thermique et examen microscopique des mortiers étudiés. Les résultats montrent la faisabilité de nouvelles combinaisons ternaires (ciment+vase calcinée+ pouzzolane naturelle) qui peuvent faciliter l'intégration de la vase calcinée dans les cimenteries comme première étape, une légère réduction de la consommation élevée en eau par la combinaison par rapport à la vase calcinée seule; une amélioration du comportement mécanique surtout à long terme, une augmentation de la résistance vis-à-vis de l'attaque à l'acide chlorhydrique, une diminution de la conductivité thermique par rapport au ciment Portland, une augmentation de la résistance des mortiers aux hautes températures et à la fin les nouvelles combinaisons ont été proposés pour le développement des bétons ou mortiers à hautes performances, et d'autres pour des mortiers de remplissage constituant les matériaux de l'enveloppe des bâtiments.

Mots-clés : Mortier, Vase calcinée, Pouzzolane naturelle, Durabilité, Effet thermique.

Abstract

Cement is the most common material used by humans after water. During its production, specialists in the field will have to face several requirements and challenges, like: reduce the carbon dioxide emissions into the atmosphere, lower energy consumption and research for new materials and waste that will allow the replacement of non-renewable natural materials that are being depleted. In order to improve the delicate economic situation of Algeria, which is largely dependent on oil revenues, the country's State relies heavily on investment in the industrial sector, such as cement production, this sector has experienced a significant production activity in the last twenty years and the country has started exports of cements since 2018. At the same time, the dams mud is a waste of the hydraulic sector resulting from natural phenomena (drought and erosion of watersheds) which is subsequently transported by storm water to the bottom of the reservoirs diminishing the quantity and quality of the drinking water. This mud is available in huge quantities with an annual increase of around 120 million cubic meters while the Algerian population needs more water.

The dams mud in the calcined state is characterized by a high pozzolanic activity as well as a technical reliability concurrent to the natural pozzolan, this mud was proposed by several Algerian researchers for the partial substitution of cement with rates up to 30%. The main objective of this work is to continue the investigations and to enrich the skills on the use of the calcined mud for the partial substitution of the cement with new ways allowing its easy integration in the production industry of cements.

To concretize the objectives, ten mortars, which one was a control and nine containing modified cements with binary and ternary mixtures between cement, calcined mud and natural pozzolan were fabricated. Tests on pastes and mortars were carried out to evaluate them in the fresh state (Standard consistency, Setting time and Workability), and in the hardened state (Compressive strength, Water absorption, Apparent densities), durability tests (hydrochloric acid Attack, Internal sulfate Attack, High Temperature Resistance), Thermal and microstructural investigation. The results show the feasibility of new ternary combinations (cement+ calcined mud + natural pozzolan) which can facilitate the integration of calcined silt in cement plants as a first step, a slight reduction in high water consumption by the combination compared to calcined mud alone; an improvement in the compressive strength, especially in the long-term, an increase in resistance to hydrochloric acid attack, a decrease in thermal conductivity compared to Portland cement, an increase in the resistance of mortars to high temperatures and at the end the new combinations have been proposed for the development of concrete or mortars with high performance, and others for mortars for filling and constituting the envelope of building materials.

Key Words: Mortars, Calcined Mud, Natural Pozzolan, Durability, Thermal Effect.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, mon épouse, mes sœurs, mon frère et ma belle mère.

À ma fille chérie, mon petit rayon de soleil, ma princesse Malek Fatima Zohra. À mes nièces Wissal, Latifa et Maria.

À tous les membres des familles: Belghit, Barouda, Bouchama et Bechnine.

À tous mes amis et collègues.

Au personnel de la Direction des Travaux Publics de la Wilaya de Mostaganem.

Au personnel de la faculté des Sciences et Technique et particulièrement le département de Génie Civil U.M.A.B Mostaganem.

Remerciements

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

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes très chers parents, qui me réservent toujours compréhension, tendresse et amour. Je remercie ma chère épouse pour son aide, sa patience et son soutien durant toute la période des études, je remercie également mes sœurs, mon frère et ma belle mère pour leurs encouragements.

Je remercie aussi mes amis et mes collègues qui m'ont apporté leur soutien intellectuel et moral tout au long de ma démarche.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon encadrant académique monsieur Bouhamou Nasr-Eddine et mon Co-encadrant monsieur Hamadache Miloud qui ont guidé mon mémoire, pour leur soutien constant, disponibilité et confiance; Aux professeurs et au cadre administratif de l'université Abd el Hamid Ibn Badis Mostaganem qui m'ont fourni les armes nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

Je remercie également les directeurs des laboratoires universitaires qui m'ont autorisé l'accès aux outils indispensables pour achever mon travail expérimental à savoir : LMPC monsieur Bourdim Sidi Mouhamed, LCTPE monsieur Mebrouki Abdelakder et LABMAT monsieur Mouli Mohamed.

Je tiens à remercier mes collègues de travail au sein de la direction des Travaux Publics de la Wilaya de Mostaganem qui m'ont soutenu et facilité la tâche durant tout mon cursus.

Je tiens à gratifier la présidente du jury madame Belas Nadia et les examinateurs messieurs Semcha Abdelaziz, Benaisa Abdelatif et Sardou Miloud d'avoir accepté d'examiner ma thèse de doctorat.

Enfin, j'adresse mes sincères sentiments de reconnaissance à toute personne ayant participé de loin ou de près à la réalisation de ce travail de recherche.

Sommaire

ملخص	i
Résumé	ii
Abstract	iii
<i>Dédicaces</i>	a
<i>Remerciements</i>	b
Introduction générale.....	2
Chapitre I : Secteur de production des ciments en Algérie : situation actuelle, problèmes et défis.	6
I. 1. Introduction	7
I. 2. Secteur de production des ciments en Algérie.....	8
I.2.1. Historique de fabrication des ciments	8
I.2.2. Consommation de l'énergie électrique de l'industrie de production des ciments	11
I.2.3. Dégagements de dioxyde de carbone par les cimenteries	12
I.2.4. La réduction du taux de clinker dans le ciment	14
I. 3. Ressources hydriques, problèmes d'érosion des bassins versants et sédimentation des barrages en Algérie.....	15
I.3.1. Les ressources hydriques.....	15
I.3.2. Les problèmes du secteur des ressources en eaux	17
I.3.2.1. Erosion des bassins versants en Algérie	19
I.3.2.2. Envasement des barrages.....	20
I.3.3. Techniques de lutte contre l'envasement des barrages.....	24
I.3.3.1. Dragage des sédiments	24
I.3.3.2. Soutirage des courants de densité.....	26
I. 4. Conclusion.....	29
Chapitre II: La vase calcinée en tant qu'addition partiellement substituable au ciment	30
II. 1. Introduction	31
II. 2. Les argiles calcinées	32
II.2.1. Définitions	32
II.2.2. Les types d'argiles.....	33
II.2.2.1. Argiles type 1:1 (Structure TO).....	33
II.2.2.2. Argiles type 2 :1 (Structure TOT)	34
II.2.3. Les Argiles les plus connus (caractéristiques).....	35
II.2.4. Processus de calcination des argiles	37
II. 3. Utilisation en tant que APSC.....	41

II. 4.	La vase calcinée en tant qu'addition partiellement substituable au ciment.....	42
II.4.1.	Paramètres d'identification	42
II.4.2.	Composition chimique de la vase calcinée.....	43
II.4.3.	Le taux de remplacement du ciment par la vase calcinée.....	44
II.4.4.	Comportement de la vase calcinée à l'état frais	46
II.4.4.1.	La consistance normalisée	46
II.4.4.2.	Le temps de prise.....	47
II.4.4.3.	Chaleur d'hydratation.....	48
II.4.5.	Comportement de la vase calcinée a l'état durci	49
II.4.5.1.	Resistance a la compression	49
II.4.5.2.	La porosité.....	52
II.4.5.3.	Propriétés de transfert (Absorption capillaire)	52
II.4.5.4.	Variation des volumes (retrait).....	54
II.4.5.4.a.	Retrait endogène.....	54
II.4.5.4.b.	Retrait de dessiccation.....	55
II.4.5.4.c.	Retrait total	56
II.4.5.4.d.	Retrait empêché.....	57
II.4.6.	Durabilité des bétons a base de la vase calcinée	58
II.4.6.1.	Influence de la carbonatation sur le béton contenant de la vase calcinée.....	59
II.4.6.2.	Comportement vis-à-vis aux attaques sulfuriques externes.....	61
II.4.6.2.a.	Sulfate de Sodium.....	61
II.4.6.2.b.	Sulfate de Magnésium.....	63
II.4.6.3.	Les Attaques acides	64
II. 5.	Conclusion.....	67
Chapitre III: Comportement des composés : durabilité et isolation thermique.....		69
III. 1.	Introduction	70
III. 2.	La durabilité des bétons et des mortiers	70
III. 3.	Attaque interne des sulfates (I.S.A).....	72
III. 4.	Résistance des mortiers vis-à-vis l'attaque a l'acide chlorhydrique « HCl ».....	77
III. 5.	Résistance des mortiers aux hautes températures.....	79
III. 6.	La conductivité thermique.....	82
III. 7.	Conclusion.....	85
Problématique et Axes de recherche		87
Chapitre IV: Matériaux utilisés		90
IV. 1.	Introduction	91
IV. 2.	Le ciment.....	91

IV. 3.	La pouzzolane naturelle.....	92
IV. 4.	La vase calcinée.....	93
IV. 5.	Les agrégats.....	95
IV. 6.	Conclusion.....	97
Chapitre V: Procédures et méthodes expérimentales		98
V. 1.	Introduction	99
V. 2.	Formulation des mortiers.....	100
V. 3.	Fabrication et préparation des mortiers	103
V. 4.	Procédures et essais	106
V.4.1.	Essais sur pâtes et mortiers à l'état frais.....	106
V.4.1.1.	Essai de consistance des pâtes	106
V.4.1.2.	Temps de début de prise et de fin de prise	107
V.4.2.	Essais a l'état durci.....	108
V.4.2.1.	La résistance à la compression	108
V.4.2.2.	La Masse volumique apparente	109
V.4.2.3.	La perte de masse des mortiers.....	109
V.4.2.4.	Absorption d'eau après immersion.....	110
V.4.3.	Essai de durabilité des mortiers	111
V.4.3.1.	Attaque acide sur les mortiers	111
V.4.3.2.	Attaque interne des sulfates sur les mortiers	112
V.4.3.3.	Résistance des mortiers vis-à-vis les hautes températures	114
V.4.3.4.	Microstructure des mortiers.....	116
V.4.3.5.	Conductivité thermique des mortiers à long terme.....	117
V. 5.	Conclusion.....	118
Chapitre VI- Résultats et discussions		119
VI. 1.	Introduction	120
VI. 2.	La caractérisation des mortiers à l'état frais	120
VI.2.1.	La consistance normalisée	120
VI.2.2.	Essais de temps de prise du ciment	122
VI. 3.	La caractérisation à l'état durci	123
VI.3.1.	Résistance a la compression des mortiers.....	123
VI.3.2.	Absorption d'eau après immersion.....	126
VI.3.3.	La variation de la masse des mortiers.....	127
VI.3.4.	Variation du volume	129
VI.3.5.	Variation de la densité apparente.....	130
VI. 4.	Les résultats d'essais de durabilité et de conductivité thermique.....	132

VI.4.1. Essai d'attaque de l'acide chlorhydrique sur mortier	132
VI.4.1.1. Inspection de la microstructure des mortiers par microscope à balayage.....	140
VI.4.2. Résistance des mortiers à l'attaque interne des sulfates (I.S.A).....	144
VI.4.3. Résistance des mortiers aux hautes températures	147
VI.4.4. La conductivité thermique des mortiers	151
VI. 5. Conclusion.....	153
Conclusion générale	158
Références	161

Liste des Figures

Figure1. 1- Évolution de livraison des logements en Algérie entre 1990 et 2015 (Lasla, Y. 2018).	8
Figure1. 2- Évolution des quantités de production des ciments avec le temps en Algérie (Belghit, A. 2022).....	9
Figure1. 3 - Production de ciment en Algérie par opérateur (Belghit, A. 2022).	10
Figure1. 4- Évolution de la consommation en Énergie Électrique en Algérie entre 2000-2014 (Djohar Larege, B. 2016) Sonelgaz.	12
Figure1. 5- Les dix pays industriels responsables des forts dégagements en CO ₂ (Benhelal, E. 2021).13	
Figure1. 6- Dégagement de CO ₂ lors de la production du clinker (Benhelal, E. 2021).	13
Figure1. 7- Évolution de dégagement de CO ₂ dans l'atmosphère avec le temps (Pedraza, J. 2021).	14
Figure1. 8- La disposition géographique des barrages dans le nord du pays (Remini, B. 2019).	17
Figure1. 9- Erosion des sols de Hammam Ouarka (Remini, B. 2013).	19
Figure1. 10- L'érosion des sols aux monts de Beni Chougrane a l'amont du barrage de Fergoug (Kara, B. 2014).	20
Figure1. 11- Mécanisme de sédimentation (Remini, B. 2003).	21
Figure1. 12- La carte de sensibilité à l'envasement d'Algérie (Remini, B. 2019).	22
Figure1. 13- État d'envasement de barrage Fergoug 90% en 2008 (Kara, B. 2014).	22
Figure1. 14- La boue au fond du lac de Fergoug (Remini, B. 2014).	23
Figure1. 15- Dragage de barrage de Foug el Gherza (Remini, B. 2005).	24
Figure1. 16- Dragage de barrage el Merdjet Sidi Abed (REMINI, B. 2005).	25
Figure1. 17- Dragage de barrage Bouhnifia en juin 2013 (Remini, B. 2015).	25
Figure1. 18- Soutirage du courant densités par les pertuis de vidange (Remini, B. 2019).	26
Figure1. 19- Cas réel des vannettes de vidange (REMINI, B. 2019).	27
Figure1. 20- Soutirage des courants densité sur Barrage Zeraldas (Remini, B. 2019).	27
Figure1. 21- Opération de soutirage des courants densités au niveau de barrage d'Ighil Emda (Remini, B. 2019).	28
Figure1. 22- La suspension soutirée par les pertuis de vidange du barrage de Beni Haroun (Remini, B. 2019).	28
Figure 2. 1- Modèle des argiles groupe 1:1 type de structure TO (Jaskulski, R. 2020).	33
Figure 2. 2- Structure tétraédrique (T), Cation tétraédrique (Jaskulski, R. 2020).	34
Figure 2. 3- Modèle des argiles groupe 2:1 type de structure TOT (Jaskulski, R. 2020).	34
Figure 2. 4- Structure octaédrique (Jaskulski, R. 2020).	35
Figure 2. 5- Structures atomique de la kaolinite (Rodrego, F, 2011).	35
Figure 2. 6- Structures atomique de l'illite (Rodrego, F, 2011).	36
Figure 2. 7- Structures atomique de la Montmorillonite (Rodrego, F, 2011).	37
Figure 2. 8- Rang des réactions en fonction de la température pendant calcination des argiles (Hanein, T. 2022).	38
Figure 2. 9- Illustration montrant l'importance du contrôle de la température dans la calcination de l'argile (Hanein, T. 2022).	39
Figure 2. 10- Effet Haricot dû aux variétés des densités des particules lors de la calcination (Hanein, T. 2022).	40
Figure 2. 11- Résultats DRX de la vase à l'état brute et état calciné (Belguessmia, K. 2018).	43

Figure 2. 12- Valeurs de (Eau /Mélange) optimales pour les quatre mélanges (Semcha,A. 2006).....	45
Figure 2. 13- Résistances à la compression des quatre mélanges (Semcha, A. 2006).	45
Figure 2. 14- Influence des dosages de 20% de vase calcinée et 20% pouzzolane naturelle sur le rapport E/L (Safer,O. 2012).	46
Figure 2. 15- Influence des dosages de vase sur les rapports E/L (Safer,O. 2017).	46
Figure 2. 16- Influence de la vase calcinée sur le temps de prise du ciment (Safer,O. 2017).	47
Figure 2. 17- Évolution de la chaleur d'hydratation en fonction du temps des mortiers à base de 10% de vase calcinée et de pouzzolane naturelle.	48
Figure 2. 18- Évolution de la chaleur d'hydratation en fonction du temps des mortiers à base de 20% de vase calcinée et de pouzzolane naturelle.	48
Figure 2. 19- Évolution de la chaleur d'hydratation en fonction du temps des mortiers à base de 30% de vase calcinée et de pouzzolane naturelle.	49
Figure 2. 20- Évolution des résistances à la compression en fonction du temps (Belguesmia, K. 2018).	50
Figure 2. 21- Comparaison des évolutions des résistances en compression des mortiers à 10% de vase de Chorfa, de Fergoug et de pouzzolane naturelle (Belaribi,O. 2015).	50
Figure 2. 22- Comparaison des évolutions des résistances en compression des mortiers à 20% de vase de Chorfa, de Fergoug et de pouzzolane naturelle (Belaribi, O. 2015).	51
Figure 2. 23- Comparaison des évolutions des résistances en compression des mortiers à 30% de vase de Chorfa, Fergoug et de pouzzolane naturelle (Belaribi,O. 2015).	51
Figure 2. 24- Distributions porales des différents BAP et leurs volumes cumulés de pores (Belguesmia,K. 2018).....	52
Figure 2. 25- Essai d'absorption capillaire sur mortiers (Taieb, F. 2019).	53
Figure 2. 26- Résultats d'essai d'absorption capillaire des six mortiers étudiés (Taieb, F. 2019).	53
Figure 2. 27- Les résultats finaux de l'essai d'absorption capillaire après 24 heures (Taieb, F. 2019)..	54
Figure 2. 28- Des éprouvettes 7×7×28 mm pour les essais de variation des volumes (Belas,N. 2008).	55
Figure 2. 29- Evolution du retrait endogène pour l'ensemble des éprouvettes (Belas, N. 2008).....	55
Figure 2. 30- Evolution du retrait dessiccation pour l'ensemble des éprouvettes (Belas, N. 2008).	56
Figure 2. 31- Evolution du retrait total pour l'ensemble des éprouvettes (Belas,N. 2008).....	56
Figure 2. 32- Anneaux de mortier pour essai de retrait empêché (Taieb, F. 2019).	57
Figure 2. 33- Suivi de la variation de la largeur de fissure sur mortier par capteur (Essai de retrait empêché) (Taieb, F. 2019).	58
Figure 2. 34- Mesure des largeurs des fissures par le capteur de fissure (Taieb, F. 2019).....	58
Figure 2. 35- Carbonatation naturelle à 12 mois (Safer,O. 2017).	59
Figure 2. 36- Profondeur de carbonatation naturelle des bétons d'études, après 12 mois à l'air libre de laboratoire (Safer,O. 2017).....	60
Figure 2. 37- Enceinte de carbonatation accélérée (Belaribi,O. 2015).....	60
Figure 2. 38- Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée des bétons.	61
Figure 2. 39- Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution du sulfate de sodium Na_2SO_4 (Belaribi,O. 2015).....	62
Figure 2. 40- Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% Na_2SO_4 (Belaribi,O. 2015).	62
Figure 2. 41- Echantillons des différents bétons, après 360 jours d'immersion dans la solution de 5% de Na_2SO_4 (Belaribi,O. 2015).....	63
Figure 2. 42- Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution de 5% $MgSO_4$ (Belaribi,O. 2015).....	63
Figure 2. 43- Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% $MgSO_4$ (Belaribi,O. 2015).....	64

Figure 2. 44- Echantillons de différents bétons, après 360 jours d'immersion dans la solution de 5% de $MgSO_4$ (Belaribi, O. 2015).....	64
Figure 2. 45- Perte de masse des BAP exposées à H_2SO_4 5% durant 12 semaines (Safer, O. 2018)....	65
Figure 2. 46- Eprouvettes de béton exposées en H_2SO_4 5% durant 12 semaines.....	65
Figure 2. 47- Perte de masse des BAP après immersion 6 semaines en H_2SO_4 5% (Belaribi, O. 2015).	66
Figure 2. 48- Eprouvettes de BAP immergées 6 semaines en H_2SO_4 5% (Belaribi, O. 2015).....	66
Figure 2. 49- Perte de masse des BAP immergés 6 semaines en HCl 5%.	67
Figure 2. 50- Eprouvettes de BAP immergées 6 semaines en HCl 5% (Belaribi, O. 2015).....	67
Figure 3. 1- Vue microscopique de la décomposition de l'ettringite en calcite du à l'attaque interne des sulfates (Colman, C. 2021).....	73
Figure 3. 2- Les conditions d'attaque interne des sulfates (Elahi, M. M. A. 2021).	74
Figure 3. 3- Vue microscopique d'un mortier ayant subi une attaque interne des sulfates (Colman, C. 2021).	75
Figure 3. 4- Coupe d'une section prismatique du mortier exposé à l'acide Chlorhydrique 15% durant 5 jours (Chandra, S. 1988).....	77
Figure 3. 5- Photo réel des incendies.(Majid, S, 2022).	79
Figure 3. 6- Sujets de recherche du sujet sur Google Scholar depuis l'An 2000 (Belghit, A. 2022). ...	80
Figure 3. 7- L'effet des hautes températures sur un mortier à base d'un ciment contenant 5% de fumée de silice : (a) 20°C, (b) 550°C (Liu, Y. 2022).	81
Figure 3. 8- L'effet des hautes températures sur un mortier à base d'un ciment contenant 5% de fumée de silice à 800°C (Yue, L. 2022).	82
Figure 3. 9- Introduction du liège avec différents diamètres pour réduire la conductivité thermique des ciments.	83
Figure 3. 10- Système de blocs en béton reliés par des joints de mortier verticaux, proposés pour réduire la conductivité thermique des murs extérieurs (Al-Jabri, K. S.2005).	84
Figure 4. 1- Ciment CEMI 42.5.....	91
Figure 4. 2: Etapes de préparation de la pouzzolane naturelle : la pouzzolane avant broyage (a), Broyeur à boulettes (b), Tamis (c) et la pouzzolane naturelle prête pour utilisation (d).	92
Figure 4. 3- Barrage Chorfa 2 Wilaya de Mascara : position géographique du barrage (a) photo du site du barrage (b).	94
Figure 4. 4- Etapes de préparation de la vase calcinée : Extraction (a), vase à l'état naturel (b), concasseur (c), vase calibrée (d), Etuve (e), Tamisage (f), Broyage (g), Calcination (h), Vase calcinée prête pour utilisation.....	95
Figure 4. 5- Sables utilisés : (a) sable alluvionnaire d'Oued el Kheir, (b) Sable concassé de Terga. ...	96
Figure 4. 6- Courbes granulométriques de sables.	97
Figure 5. 1- Caractérisation technique des matériaux selon l'utilisation.....	99
Figure 5. 2- Maniabilimetre type B.	100
Figure 5. 3- Des éprouvettes de mortiers de forme prismatique 40×40×160 mm.	101
Figure 5. 4- Résistances à la compression des mortiers normalisés contenant 10%, 30% et 50% de la vase calcinée et la pouzzolane naturelle.	102
Figure 5. 5- Malaxeur de mortier CONTROLAB.	104
Figure 5. 6- Confection des éprouvettes prismatiques 40x40x160 mm.	104
Figure 5. 7- Mortiers à l'état frais confectionnés et protégés par un film plastique : Moules 3x cubes de 50 mm (a) et des moules 3x barres de 25×25x×285 mm.	105
Figure 5. 8- Cure à eau saturée en chaux.....	105
Figure 5. 9- Appareil Vicat pour la détermination de la consistance normalisée et le temps de prise : Appareil Vicat (a), Aiguille pour la détermination de la consistance normalisée (b).	106

Figure 5. 10- Essai de détermination du temps de prise (a), Aiguille pour la détermination du temps de début de prise (b), Aiguille pour la détermination du temps de la fin de prise (c).	107
Figure 5. 11- Essais mécaniques : Résistance à la traction par flexion (a), Résistance à la compression (b).	108
Figure 5. 12- Mesure de la masse des éprouvettes sous l'eau (Pesée hydrostatique).	110
Figure 5. 13- Préparation des solutions d'acide chlorhydrique avec des concentrations 2% et 5%. ...	111
Figure 5. 14- Immersion des éprouvettes dans la solution acide HCl avec concentration 5%.	112
Figure 5. 15- Suivi des expansions des barres 25x25x285 mm: Barres 25x25x285 mm équipées des plots de mesure (a) Rétractomètre (b)	113
Figure 5. 16- Essai de résistance des mortiers aux hautes températures : Four Nobertherm (a), Mise en place des demi- éprouvettes prismatiques 40x40x80 mm dans le four (b), Essai de compression sur les demi éprouvettes 40x40x80 mm.	115
Figure 5. 17- Microscope à balayage Quattro (Fiche technique de l'appareil).	116
Figure 5. 18- Conductivimetre Isomet 2104.	118
Figure 6. 1- La consistance normalisée des mortiers.	121
Figure 6. 2- Résultats de temps de prise des ciments.	122
Figure 6. 3- Résistance des dix mortiers à la compression.	123
Figure 6. 4- Résistances à la compression des mortiers avec des taux de remplacement du ciment par 10% des APSC.	124
Figure 6. 5- Résistances à la compression des mortiers avec des taux de remplacement du ciment par 20% des APSC.	124
Figure 6. 6- Résistances à la compression des mortiers avec des taux de remplacement du ciment par 30% des APSC.	125
Figure 6. 7- Absorption d'eau après immersion.	126
Figure 6. 8- Gain de masse des mortiers dans une cure normale.	128
Figure 6. 9- Perte de volume des mortiers dans une cure normale.	129
Figure 6. 10- Gain de densité dans une cure normale.	131
Figure 6. 11- Perte de masse des mortiers exposés à l'acide chlorhydrique 2%.	132
Figure 6. 12- Diminution de volume des mortiers exposés à l'acide chlorhydrique 2%.	133
Figure 6. 13- Les mortiers MT, MV10, MP10, MV5P5, MP20 et MV30 après 15 semaines d'immersion en acide chlorhydrique 2% de concentration.	134
Figure 6. 14- Gain de densité des mortiers exposés à l'acide chlorhydrique 5%.	135
Figure 6. 15- Perte de masse des mortiers exposés à l'acide chlorhydrique 5%.	136
Figure 6. 16- Diminution de volume des mortiers exposés à l'acide chlorhydrique 5%.	137
Figure 6. 17- Gain de densité des mortiers exposés à l'acide chlorhydrique 5%.	138
Figure 6. 18- Les mortiers MT, MV10, MP10, MV5P5 et MV30 après 15 semaines d'immersion en acide chlorhydrique 5% de concentration.	138
Figure 6. 19- Les dix mortiers après avoir exposé pendant 5 semaines dans l'acide chlorhydrique 5%.	139
Figure 6. 20- Vues microscopiques 50 µm par MEB des mortiers : (a) MT 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux (b) MT exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (c) MV10 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux, (d) MV10 exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (e) MP10 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux, (f) MP10 exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (g) MV5P5 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux, (h) MV5P5 exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (i) MV30 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux et (j) MV30 exposé à 5% HCl durant 15 semaines.	142
Figure 6. 21- Vues microscopiques 100 µm par MEB des mortiers : (a) MT 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux (b) MT exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (c) MV10 180 jours dans une	

cure en eau saturée en chaux, (d) MV10 exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (e) MP10 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux, (f) MP10 exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (g) MV5P5 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux, (h) MV5P5 exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (i) MV30 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux et (j) MV30 exposé à 5% HCl durant 15 semaines.	144
Figure 6. 22- Variation de longueur des dix mortiers.....	145
Figure 6. 23- Expansion des mortiers exposés aux attaques internes au sulfate.	146
Figure 6. 24- Résistance à la compression des mortiers exposés aux hautes températures.....	148
Figure 6. 25- Chute des résistances à la compression des mortiers exposés aux hautes températures.	149
Figure 6. 26- Les mortiers après exposition à 800 °C pendant 2 heures.	150
Figure 6. 27- La conductivité thermique des mortiers.....	151
Figure 6. 28- La conductivité thermique des mortiers avec des taux de remplacement du ciment par 30%.....	152

Liste des Tableaux

Tableau 1. 1- Le taux de clinker par type de ciment produit en Algérie.	11
Tableau 1. 2- Structure de consommation de l'industrie Algérienne en électricité (Djohar Larege, B. 2016) Sonelgaz.	11
Tableau 1. 3- Taux de consommation de l'énergie électrique durant le temps (Djohar Larege, B. 2016) Sonelgaz.	12
Tableau 1. 4- Bassins versants par régions hydrographiques (ANRH) (Guergueb, M. 2021).	15
Tableau 1. 5- La liste des barrages en Algérie 2022 (Site officiel de l'ANBT).	16
Tableau 1. 6- Liste des grandes stations de dessalement en Algérie (Guergueb, M. 2021).	17
Tableau 1. 7- Dotation annuelle en eau par habitant en Algérie (Guergueb, M. 2021).	18
Tableau 2. 1- Composition chimique de barrage FERGOUG (Belas, N. 2008).	44
Tableau 2. 2- caractéristiques chimiques de la vase de Chorfa (Safer, O. 2017).	44
Tableau 2. 3- Composition des mélanges ciment- vase (Semcha, A. 2006).	44
Tableau 3. 1- Composition chimique des mortiers après attaque a l'acide chlorhydrique 15% durant 5 jours sur les 5 zones de la Figure 3.4 (Chandra, S. 1988).	78
Tableau 4. 1- Caractéristiques physiques du ciment CEMI.	92
Tableau 4. 2- Composition chimique du ciment CEMI.	92
Tableau 4. 3- Composition minéralogique du clinker calculée selon les formules de Bogue.	92
Tableau 4. 4- Les caractéristiques physiques de la Pouzzolane naturelle.	93
Tableau 4. 5- La composition chimique de la Pouzzolane naturelle.	93
Tableau 4. 6- Caractéristiques physiques de la Vase calcinée.	94
Tableau 4. 7- Composition chimique de la vase calcinée.	94
Tableau 4. 8- Caractéristiques techniques de sable alluvionnaire de Oued el Kheir.	96
Tableau 4. 9- Composition chimique du sable alluvionnaire de oued el Kheir.	96
Tableau 5. 1- Formulations des mortiers et des pâtes.	102
Tableau 5. 2- Méthode de malaxage des mortiers.	103
Tableau 6. 1- Tableau récapitulatif des résultats obtenus.	155

Introduction générale

Introduction générale

Le ciment est un matériau de construction d'une importance éminente, produit à base de matériaux naturels ou industriels disponibles et pas cher. Le composant principal du ciment est appelé clinker résultat d'une opération de cuisson des matières premières (calcaire et argile en général) à une température avoisinant 1450°C dans des fours spécialisés pour cette opération ensuite broyés et renvoyés pour utilisation.

Ce procédé de fabrication du clinker est caractérisé par un fort dégagement de dioxyde de carbone dans l'atmosphère avec des quantités énormes estimées à 2.2 milliards de tonnes en 2021 en plus de ça une forte consommation en énergies et matériaux naturels non renouvelables en voie d'épuisement, ce qui a obligé des spécialistes de l'environnement de tirer la sonnette d'alarme afin d'améliorer cette situation.

Pour réduire l'impact négatif sur l'environnement dû à la production du clinker, les spécialistes du domaine des matériaux de construction ont proposé plusieurs alternatives de court et long terme. La meilleure alternative de court terme pour lutter contre les effets négatifs sur l'environnement par l'industrie de production des ciments est de remplacer une partie du ciment par des additions ou des déchets pouvant le substituer partiellement.

Les matériaux les plus connus et qui étaient déjà utilisés en tant qu'addition substituable partiellement au ciment (APSC) sont : le granulé des hauts fourneaux (1862), les cendres volantes (1934), la fumée de silice (1947), le metakaolin (1960). Et à ce jour, les chercheurs n'arrêtent pas de proposer de nouveaux matériaux pour jouer ainsi le même rôle.

En Algérie, les cimenteries depuis l'indépendance du pays ne cessent de croître et de doubler les quantités de production du ciment, et même ces dernières années l'État Algérien a insisté sur l'investissement dans ce secteur et de suivre une stratégie d'exportation des ciments pour améliorer la situation économique du pays.

Au même temps, le secteur des ressources en eaux dans le pays souffre du problème d'envasement des barrages ce qui réduit la capacité de stockage des réservoirs et affecte la

qualité d'eau potable dans un temps où la population Algérienne nécessite plus d'eau pour suffire ces besoins journaliers.

Plusieurs chercheurs ont proposé la réutilisation des sédiments de plusieurs barrages en tant qu'addition substituable partiellement au ciment avec des taux variant de 10 à 30%. Ceci a été approuvé après l'élaboration des essais d'identifications et de faisabilité.

Le présent travail vise à poursuivre les recherches sur l'utilisation des sédiments des barrages en Algérie en tant qu'additions partiellement substituables au ciment, d'approuver les recherches déjà effectuées sur ce sujet et d'enrichir les compétences sur ce matériau d'une façon permettant son introduction dans l'industrie du ciment et de se conformer aux exigences mondiales à savoir réduire la quantité du clinker dans le ciment pour le bien de l'environnement et de conserver les ressources naturelles du pays.

L'industrie de production des ciments est parmi les filières industrielles importantes dont l'État Algérien compte investir pour équilibrer la situation économique du pays dépendante principalement de la rente pétrolière. Néanmoins, le secteur connaît quelques problèmes techniques nécessitant des études sérieuses (Fort dégagement de CO₂, haute consommation d'énergie, ressources naturelles non renouvelables en voie d'épuisement). Pour cela, la solution d'utilisation de la vase calcinée des barrages pour le remplacement partiel du ciment a été vaguement proposée pour l'amélioration de la situation actuelle, ces points ont été développés en détail dans le **Chapitre I**.

Dans le **Chapitre II**, et pour une bonne compréhension technique de l'utilité de la vase des barrages à l'état calciné, une étude bibliographique approfondie a été menée sur l'utilisation des argiles calcinées pour la substitution partielle du ciment, les points en commun avec la vase calcinée des barrages, les raisons qui ont permis l'augmentation d'intérêt sur ce sujet dans les dernières années, les types d'argiles destinés pour ce domaine d'utilisation, les techniques industrielles de calcination et de préparation du matériau avant utilisation dans la production des ciments.

La deuxième partie du **Chapitre II** présente un récapitulatif des recherches effectuées sur l'utilisation de la vase calcinée des barrages pour la substitution partielle du ciment: les paramètres d'identification du matériau, les caractéristiques techniques de la vase dans sa forme naturelle ou dans des mélanges (mortier ou béton) aux états frais et durci. Ainsi que les résultats de suivi du comportement des bétons et des mortiers vis-à-vis des différents types

d'attaques agressives qui peuvent être présentes dans son environnement pour lequel ils ont été conçus.

Les caractéristiques techniques intrinsèques des bétons, à l'état frais telles que l'ouvrabilité ou à l'état durci comme le comportement mécanique ne sont plus les seuls indicateurs de jugement de la qualité de ces matériaux de construction. Aussi, la durabilité ainsi que les paramètres influant cette dernière, sont devenues des critères d'évaluation de la qualité des bétons qu'on croise sur toutes les fiches techniques et les textes techniques modernes. La littérature de plusieurs paramètres a été mise sous la lumière dans le **Chapitre III**, surtout ceux qui n'ont pas été déjà étudiés précédemment à savoir: la résistance aux attaques interne des sulfates, la résistance des mortiers aux hautes températures, la conductivité thermique.

L'étude bibliographique détaillée élaborée a permis de fixer les objectifs du travail, développer une problématique actualisée sur le sujet et de procéder à planification du programme expérimental nécessaire permettant d'atteindre les objectifs fixés et de répondre aux questions posées.

Les matériaux utilisés pour l'élaboration du présent travail expérimental, les méthodes de préparation et conservation de ces matériaux et les paramètres d'identification permettant le jugement de la qualité de ces matériaux selon la normalisation en vigueur ont fait l'objet du **Chapitre IV**.

La méthode de préparation des mélanges et de fabrication des mortiers, les essais d'identification des pâtes et des mortiers à l'état frais (essai de consistance normalisée, essais de temps de prise, essai de maniabilité). Des essais sur les mortiers à l'état durci (Compression, Absorption d'eau, Densités apparentes), des essais de durabilité (Attaque à l'acide chlorhydrique, Attaque interne des sulfates de sodium, Résistance aux hautes températures), des essais de mesure de conductivité thermique et des vues Microscopiques (MEB) ont eu lieu sur le **Chapitre V**.

Le **Chapitre VI** résume les résultats des essais élaborés, les interprétations des résultats obtenus, les comparaisons avec d'autres travaux cités dans la bibliographie, les limitations des expériences faites et les propositions permettant le développement du domaine de compétence dans le futur.

Les conclusions générales clôturent ce mémoire en synthétisant les principaux résultats sur les paramètres étudiés. Des perspectives de recherches sont aussi présentées pour continuer le développement des compétences sur ce sujet et de permettre l'introduction de l'utilisation des déchets naturels renouvelables dans l'industrie du ciment en Algérie.

Chapitre I : Secteur de production des ciments en Algérie : situation actuelle, problèmes et défis.

Chapitre I : Secteur de production des ciments en Algérie : situation actuelle, problèmes et défis.

I. 1. Introduction

L'Algérie est un pays Nord-africain situé au sud du bassin Méditerranéen, le plus grand pays dans le continent avec une surface totale de 2.383.741 Km² dont plus de 80% de cette surface est un désert (Guergueb, M. 2021) et d'une population habitante de 45.4 Millions en premier janvier 2022 (ONS. 2022).

Les gouvernements successifs depuis l'indépendance du pays en 1962 ont essayé de développer une économie forte par la diversification industrielle en dehors de la rente des hydrocarbures (Gaz naturel, pétrole... etc).

Durant les vingt dernières années, le pays a connu une augmentation remarquable dans le rythme de réalisation des projets du secteur d'habitat pour répondre à la forte demande des logements (Lasla, Y. 2018). L'augmentation a été importante vu que 299 469 unités sont réalisées par An entre 2013-2015 alors que justes 39 121 unités ont été réalisées dans la période entre 1990-1993 par An (Figure 1.1) (Lasla, Y. 2018).

Au même temps, plusieurs projets de renforcement des infrastructures de base ont été lancés à savoir : des projets des routes, autoroutes, tramways, aéroports, chemins de fer, centrales électriques, barrages, stations de dessalement et zones d'activités industrielles, ce qui a augmenté la demande interne en matériaux de construction ainsi qu'à la consommation d'énergie. En parallèle à ces projets, plusieurs industries locales ont connu un développement remarquable pour répondre aux besoins de ces projets en matériaux de construction dont la plus importante est celle de production des ciments. Cette dernière est classée par l'État Algérien comme un secteur stratégique en dehors des hydrocarbures, et le pays a exporté ses premières vagues en ciment vers l'extérieur en 2018 (A.P.S. 2018).

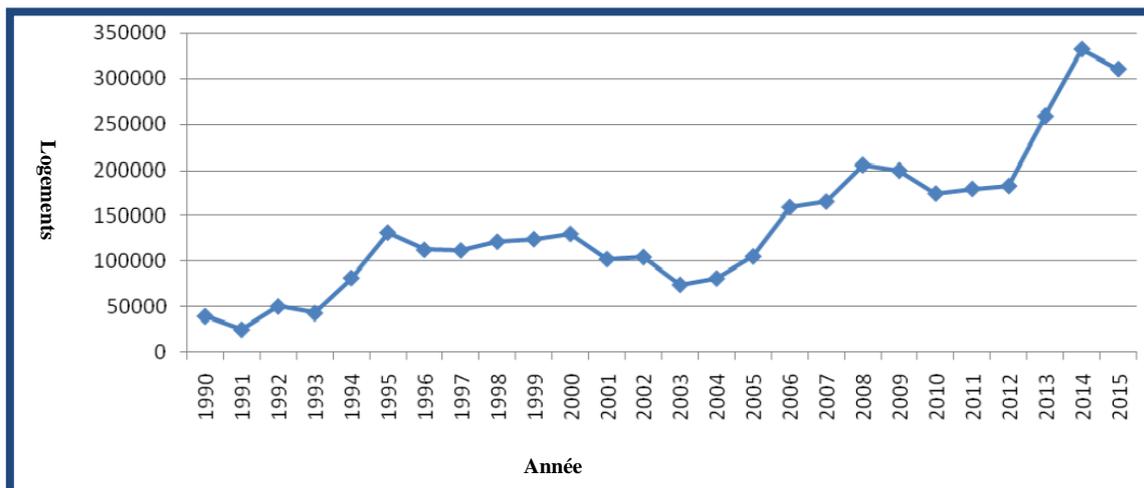


Figure1. 1- Évolution de livraison des logements en Algérie entre 1990 et 2015 (Lasla, Y. 2018).

Le présent chapitre traite la situation actuelle du secteur de production des ciments en Algérie, les quantités produites, les techniques utilisées par les cimenteries et les produits disponibles, les problèmes de ce secteur et les solutions importantes proposés pour prendre en charge ces problèmes.

I. 2. Secteur de production des ciments en Algérie

I.2.1. Historique de fabrication des ciments

Le secteur de production des ciments en Algérie est passé par plusieurs étapes depuis l'indépendance du pays en 1962 à savoir :

- Avant 1962 où il y avait que trois cimenteries qui ont été en production par la voie humide Rivet Lafarge, Pointe Pescade Lafarge et Saint-Lucien Cado d'une capacité totale de production d'Un million cinq cents Tonnes de ciment.
- Après l'indépendance du pays où le secteur a connu la nationalisation de ces cimenteries sous le nom Société Nationale des Matériaux de Construction (SNMC).
- Entre 1967 à 1983 la SNMC a développé les lignes héritées par l'installation de 12 nouvelles lignes de production par la voie sèche ce qui a augmenté la capacité de production à 10 Millions Tonnes/An.
- Entre 1983 à 2005 le secteur a connu le lancement de trois nouvelles lignes de production à Ain Touta (Batna), El Elma Labiod (Tébessa) portant la capacité de production à 11.5 millions tonnes /An, Ensuite le nouveau projet privé à El Msila au compte du groupe Orascom.

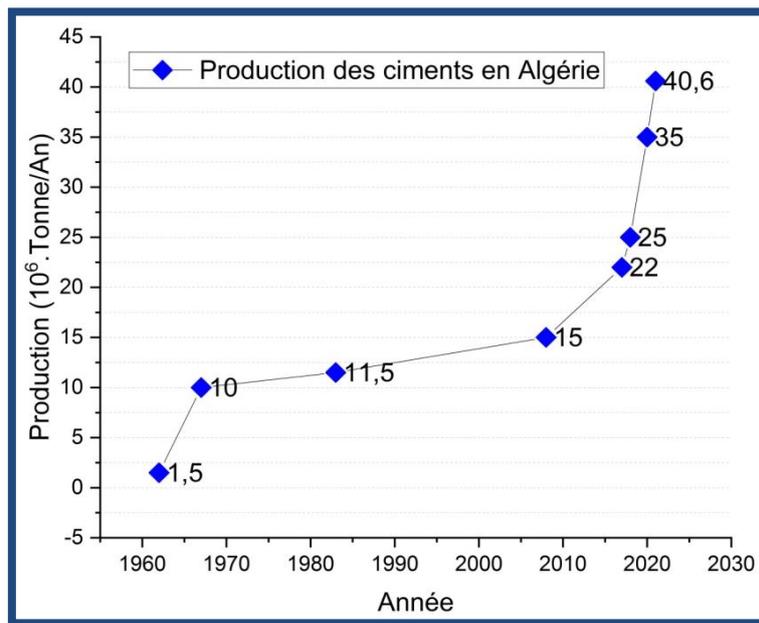


Figure 1. 2- Évolution des quantités de production des ciments avec le temps en Algérie (Belghit, A. 2022).

- En 2006 deux nouveaux projets ont été prévus à savoir celui du Sig (Orascom) avec une capacité de 2 Millions Tonnes/An et celui de Djelfa (Asec-Égypte) avec 1.5 Millions Tonnes produites par An dont la capacité de production du pays est passée à 15 millions Tonnes par An (Figure 1.2).
- Après 2008, le rythme de développement du secteur s’est accéléré en matière de nouvelles implantations (OUADA, Y. 2011).
- En 2018 le nombre des cimenteries s’est multiplié à 17 avec une augmentation de production annuelle ramenant la quantité entre 25 à 30 millions Tonnes/An (APS 23/10/2018).
- Aujourd’hui, l’Algérie dispose de 20 cimenteries installées à plusieurs endroits du pays avec une production totale de 40 millions Tonnes depuis 2020 (APS. 2022)

Actuellement seul le groupe Industriel des ciments d’Algérie « GICA » dispose de 14 cimenteries (Site officiel de l’entreprise) avec une production annuelle de 20 Millions Tonnes (Figure 1.3).

Le deuxième producteur des ciments « Lafarge Holcim » avec une production annuelle de 11.1 Millions Tonnes (Figure 1.3). Et le reste des opérateurs privés avec une production de 9.5 Millions Tonnes par An (A.P.S. 2020). Ce qui rend la production nationale des ciments en Algérie de à 40.6 Millions. Tonnes par An (Figure 1.2).

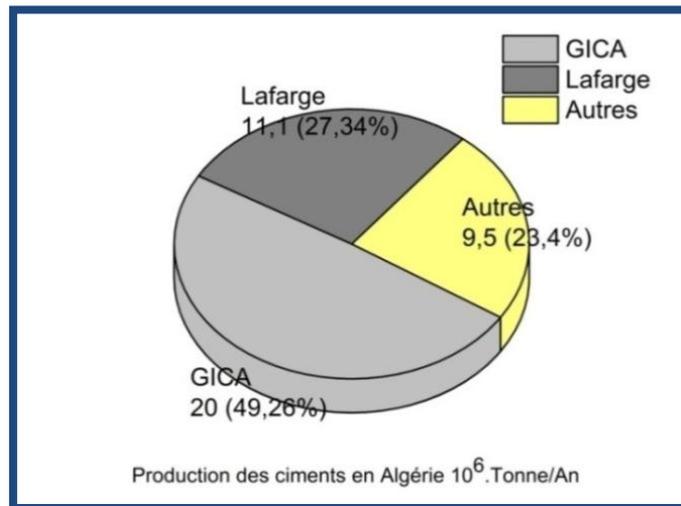


Figure1.3 - Production de ciment en Algérie par opérateur (Belghit, A. 2022).

Les qualités des ciments produites par les cimenteries en Algérie sont multiples. Les types de ciments produits par la société « GICA » (Site officiel de l'entreprise) sont:

- Le ciment CEMI 52.5.
- Le ciment CEMII 32.5.
- Le ciment CEMII 42.5N.
- Le ciment CEMII 42.5 R.
- Le ciment CEMII 42.5 SR 5.
- Le ciment CEMII 42.5 SR3.

Et les types de ciments produits par « Lafarge Holcim » (Site officiel de l'entreprise) sont:

- Le ciment « Chamil » : CEMII B-L 32.5.
- Le ciment « Matine » : CEMII A-L 42.5.
- Le ciment « Sarie » : CEMII A-L 52.5.
- Le ciment « Moukaouim » : CEMI 42.5 N-SR 3.

Note : Les informations sur les produits du secteur privé ne sont pas disponibles.

Comme montrés dans le Tableau 1.1, tous les ciments locaux (sus cités) sont produits principalement à base de clinker avec des taux élevés, spécialement les ciments résistant aux sulfates avec un taux de clinker supérieur à 95%.

Tableau 1. 1- Le taux de clinker par type de ciment produit en Algérie.

Produits	Taux de Clinker (%)
Le ciment CEMI 52.5 (CRS).	95-100
Le ciment CEMII 32.5.	65-94
Le ciment CEMII 42.5N.	65-94
Le ciment CEMII 42.5 R.	65-94
Le ciment CEMII 42.5 SR 5 (CRS)	65-94
Le ciment CEMII 42.5 SR3 (CRS).	65-94
Le ciment « Chamil » : CEMII B-L 32.5	65-79
Le ciment « Matine » : CEMII A-L 42.5	80-94
Le ciment « Sarie » : CEMII A-L 52.5.	80-94
Le ciment « Moukaouim » : CEMI 42.5 N-SR 3 (CRS).	95-100

Note : « CRS » représente une abréviation du ciment résistant aux sulfates.

1.2.2. Consommation de l'énergie électrique de l'industrie de production des ciments

La consommation énergétique d'industrie de fabrication des ciments représente le quart de la quantité globale de l'industrie en Algérie (Tableau 1.2) dont cette consommation induite par la production des ciments a été multipliée à 37.6 fois entre 1970 à 2015 (Figure 1.4) (Djohar Larege, B. 2016).

Tableau 1. 2- Structure de consommation de l'industrie Algérienne en électricité (Djohar Larege, B. 2016) Sonelgaz.

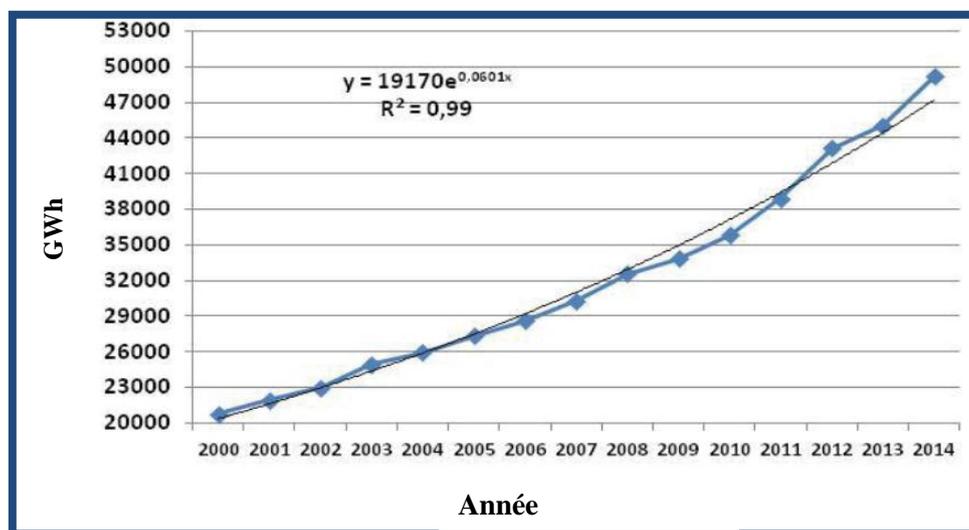
Secteur	Année	1980	2000	2014
	Eau, Énergie (%)	2.29	2.46	19.03
	Hydrocarbures (%)	29.78	46.71	34.49
	Mines et carrières (%)	3.41	1.03	0.41
	Industries sidérurgiques, métalliques, mécaniques et électriques (%)	23.44	21.66	13.43
	Matériaux de construction (%)	28.77	21.56	23.31
	Industries textiles (%)	1.7	0.52	0.10
	Bois, Papier et liège (%)	3.78	1.09	0.36
	Chimie, Caoutchouc et plastique (%)	5.97	4.15	6.60
	Industries Agro-alimentaires (%)	0	0	0.85
	Hôtels, restaurants et cafés (%)	0	0	0.20
	Transport et PTT (%)	0.85	0.83	1.22
	Total (%)	100	100	100

Pour la période entre 2000 et 2014, l'industrie des ciments a doublé de consommation en énergie électrique et multipliée la production par 2.42 pour la même période (Djohar Larege, B. 2016).

Tableau 1.3- Taux de consommation de l'énergie électrique durant le temps (Djohar Larege, B. 2016) Sonelgaz.

Temps \ Année	2000 (%)	2014 (%)
Heures de pointe	15.16	16.25
Heures pleines	52.86	51.35
Heures creuses	31.98	32.45
Total	100	100

Pour la bonne gestion d'énormes dépenses énergétiques des cimenteries, ces dernières ont renforcé leurs rythmes de production pendant les horaires creux et diminuent leurs productions durant les horaires de pointe (Tableau 1.3).

**Figure1. 4-** Évolution de la consommation en Énergie Électrique en Algérie entre 2000-2014 (Djohar Larege, B. 2016) Sonelgaz.

1.2.3. Dégagements de dioxyde de carbone par les cimenteries

Les dégagements industriels énormes de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère provoquent une augmentation la concentration atmosphérique des gaz à l'effet de serre causant le réchauffement climatique (Benhelal, E. 2021).

Dix pays industriels sont responsables de 70% des dégagements de Co₂ dans l'atmosphère (Figure 1.5).

Après les centrales électriques classées comme la première source émettrice de dioxyde de carbone (25% d'missions mondiales). Ensuite l'industrie de fer et de l'acier responsable de 7.2 %. L'industrie du ciment est en troisième classement responsable de 5% des dégagements en CO₂ dans là l'atmosphère (Benhelal, E. 2021).

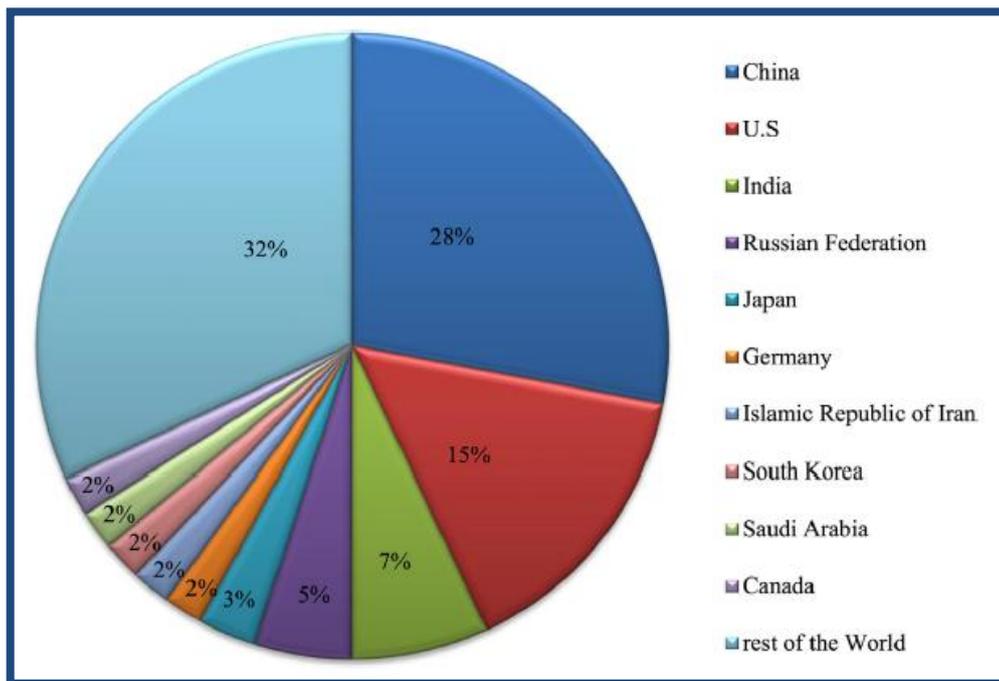


Figure 1. 5- Les dix pays industriels responsables des forts dégagements en CO₂ (Benhelal, E. 2021).

Le clinker est un produit de cuisson d’un mélange minéral contenant majoritairement de calcaire et taux considérable d’argile (autour de 20%) avec une température avoisinant les 1450°C dans des fours rotatifs spécialisés, ensuite broyé dans des broyeurs jusqu’à atteindre la finesse voulue.

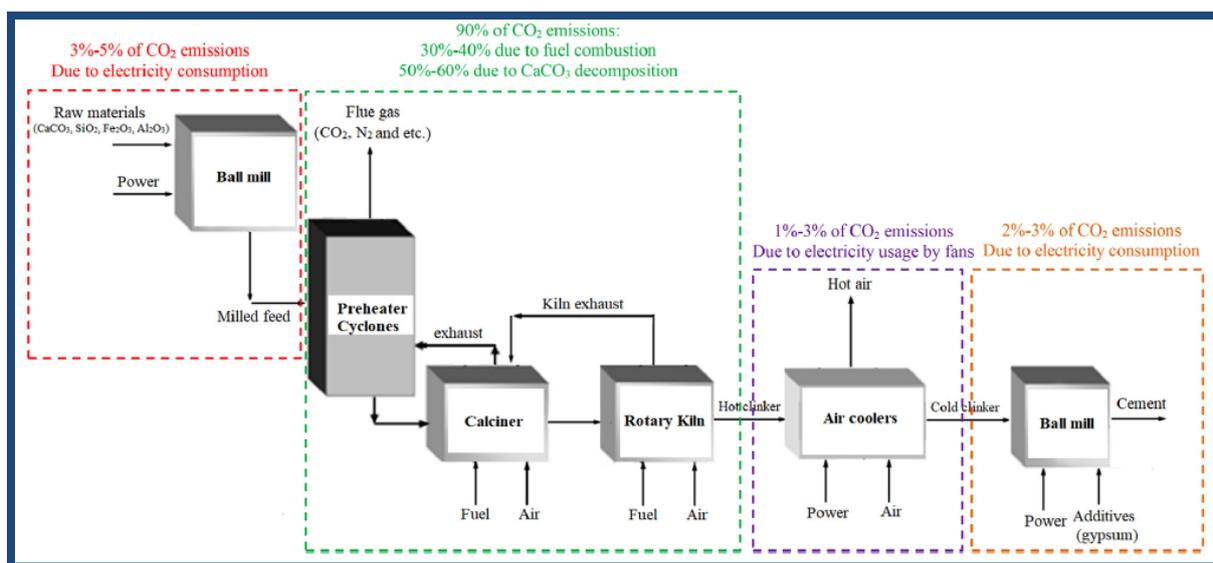


Figure 1. 6- Dégagement de CO₂ lors de la production du clinker (Benhelal, E. 2021).

En tant que pays qui compte investir dans la production des ciments et augmenter la cadence dans l’avenir, l’Algérie doit prendre en considération ces problèmes sachant

qu'actuellement les cimenteries Algériennes ne dépassent pas 22 Millions Tonnes de dioxyde de carbone (CO₂) annuellement dont ces quantités ne dépassent pas le 1% des dégagements mondiaux.

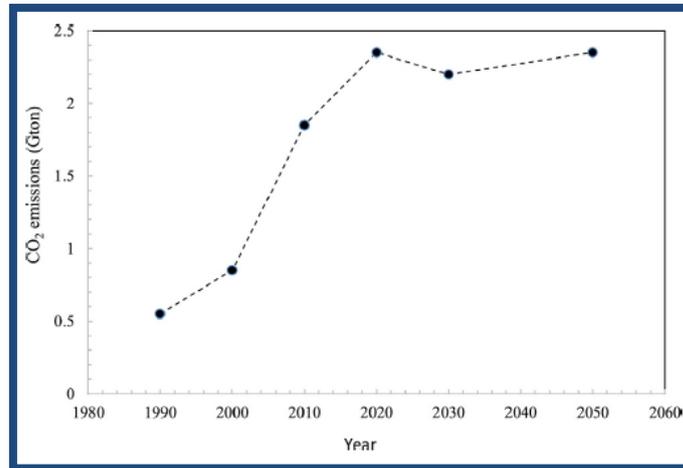


Figure 1.7- Évolution de dégagement de CO₂ dans l'atmosphère avec le temps (Pedraza, J. 2021).

1.2.4. La réduction du taux de clinker dans le ciment

Pour réduire les dégagements de CO₂ et diminuer l'énergie de production néfaste pour l'environnement, plusieurs matériaux ont été proposés pour substitution partielle du ciment afin de jouer un rôle pouzzolanique.

Parmi les matériaux proposés pour la substitution partielle du ciment la vase calcinée des barrages qui est un déchet naturel renouvelable périodiquement et qui a prouvé son rôle dans plusieurs recherches dans ce domaine de remplacement du clinker avec des taux allant jusqu'à 30% dans le ciment.

Les matériaux utilisés actuellement par les cimenteries Algériennes pour la constitution principale du ciment avec le clinker sont: la pouzzolane naturelle, le calcaire, le laitier des minerais de fer et la fumée de silice mais avec des quantités limitées. Mais avec l'augmentation de production des ciments prévue, les responsables sont obligés de réfléchir pour engager des nouveaux matériaux dans ce domaine d'utilisation afin de préserver les ressources naturelles du pays et lutter contre l'épuisement des ressources non renouvelables.

I. 3. Ressources hydriques, problèmes d'érosion des bassins versants et sédimentation des barrages en Algérie

I.3.1. Les ressources hydriques

Les ressources hydriques en Algérie sont estimés à 18 milliards m³/An dont 12.5 milliards de mètre cube par an (M.m³/An) dans la zone nord et 5.5 M.m³/An dans la zone sud du pays, l'ensemble des écoulements superficiels sont estimés à 10 milliards m³/An au nord et 2.5 M.m³/An au Sud, pour les eaux souterraines 2.5 M.m³/ An au nord du pays et 5 M.m³/ An aux zones sud du pays (Diab, D. I. 2013).

Le pays dispose naturellement de cinq régions hydrographiques et 17 bassins versants (Tableau 1.4).

Pour lutter contre le manque en ressources hydriques l'État Algérien a procédé à plusieurs actions, parmi ses actions on cite la réalisation d'un nombre important de barrages surtout dans les vingt dernières années passées.

Lors de l'indépendance du pays en 1962 dont il existait que 14 barrages, le chiffre a été multiplié en 2015 à 74 barrages et à 78 en 2021 (Guergueb, M. 2021).

Tableau 1. 4- Bassins versants par régions hydrographiques (ANRH) (Guergueb, M. 2021).

Régions hydrographiques	Superficie en Km ²	Bassins versants
Oranie-Chott Chergui	77 169	Cotiers oranais Macta Tafna
Chelif-Zahrez	56 227	Chot chergui Cotiers Dahra Cheliff Chot Zahrez
Algérois-Hodna-Soummam	47 431	Cotiers algérois Sébaou Isser Soummam Chot Hodna
Constantinois-Seybousse-Melegue	44 348	Cotiers constantinois Kébir Rhumel Medjerdah Mellegue Seybousse Hauts plateaux
Sahara	2 018 054	Constantinois Sahara Chot melghir

Selon le site officiel de l'Agence Nationale des Barrages et de Transfert (ANBT), actuellement le chiffre est à 80 barrages comme montrés dans le Tableau 1.5 et qui sont répartis comme suit : 15 dans la région Ouest, 17 régions Chélif et 18 régions Centre et 30 régions Est (Tableau 1.5 et Figure 1.8), dont la plupart des barrages ont été réalisés dans les dernières 40 ans (Diab, D. I. 2013).

Tableau 1.5- La liste des barrages en Algérie 2022 (Site officiel de l'ANBT).

Région Ouest	Région Chélif	Région Centre	Région Est
1- Beni Bahdel	1- Merdja Sidi	1- Kef Eddir	1- Tabellout
2- Meffrouch	Abed	2- Bouroumi	2- KSob
3- Sidi Abdelli	2- Gargar	3- Ladrat	3- Ain Zada
4- Hammam Boughrara	3- Sidi Mhamed Ben Aouda	4- Meurad	4- Hammam Grouz
5- Sarno	4- Bakhadda	5- Boukourdane	5- Ain Dalia
6- Cheurfas II	5- Dahmouni	6- Keddara	6- Zardezas
7- Ouizert	6- Colonel Bougara	7- Beni Amrane	7- Guenitra
8- Bouhanifia	7- Sidi Yacoub	8- Hamiz	8- Hammam Debagh
9- Fergoug	8- Oued Fodda	9- Lekhal	9- Cheffia
10- Djorf Torba	9- Deurdeur	10- Taksebt	10- Foum El Gueiss
11- Sekkak	10- Harreza	11- Tilesdit	11- Babar
12- Kramis	11- Ghrib	12- Mahouane	12- Foum EL Gherza
13- Brezina	12- Boughzoul	13- Tichy Haf	13- Mexa
14- Taht	13- Oued Mellouk	14- Koudiat Acerdoune	14- Fontaine des Gazelles
15- Seklafa	14- Koudiat Rosfa	15- Beni Slimane	15- Zit el Emba
	15- Sidi Mhamed Ben Taiba	16- Draa Diss	16- Beni-Zid
	16- Prise Chelif	17- Douera	17- El Agrem
	17- Kerrada	18- Ighil Emda	18- Koudiat Medouar
			19- Beni Haroun
			20- Oued Cherf
			21- Oued Athmania
			22- Kissir
			23- Tagharist
			24- Boussiaba
			25- Soubella
			26- Ourkiss
			27- Saf Saf
			28- Erraguen
			29- Bougous
			30- Ouldjet Mellègue

Afin d'accroître les ressources hydriques en Algérie spécialement en eaux potables pour suffire les besoins de la population habitante en augmentation, l'État Algérien à procéder

à la réalisation de plusieurs stations de dessalement sur toute la littorale Algérienne comme montrée dans le Tableau 1.6.

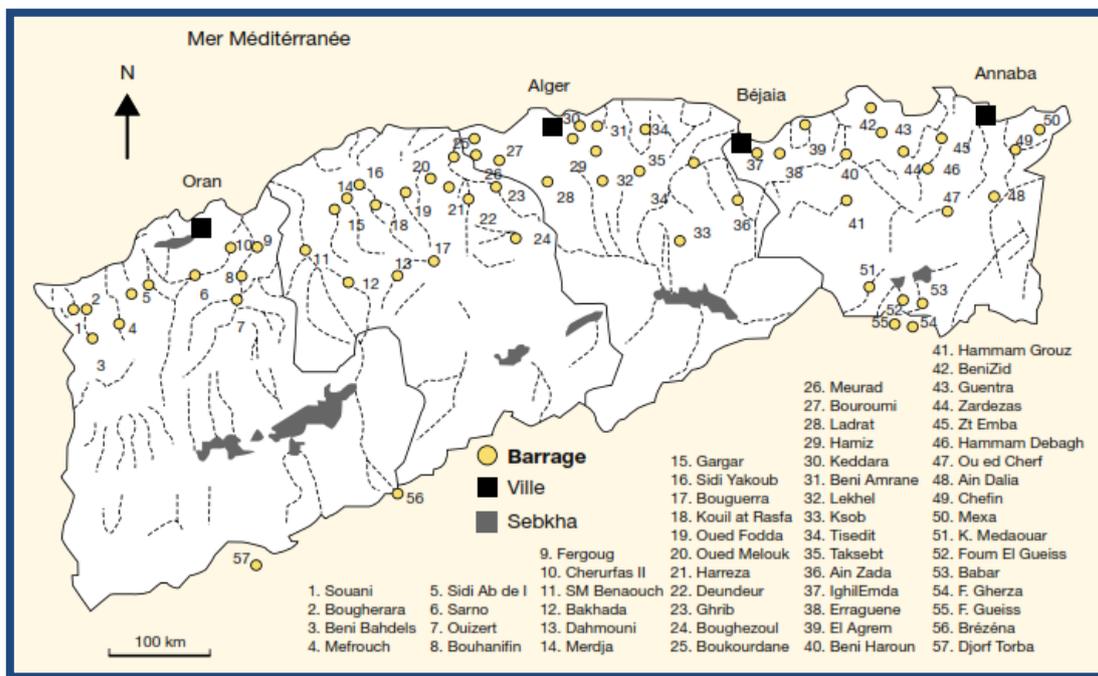


Figure1. 8- La disposition géographique des barrages dans le nord du pays (Remini, B. 2019).

Tableau 1. 6- Liste des grandes stations de dessalement en Algérie (Guergueb, M. 2021).

Station de dessalement	Wilaya d’implantation	Capacité de production
Station de dessalement de Tenes	Chlef	200 000 m ³ /Jour
Station de dessalement de Souk Tléta	Tlemcen	200 000 m ³ /Jour
Station de dessalement de Honaïne	Tlemcen	200 000 m ³ /Jour
Station de dessalement de Hamma	Alger	200 000 m ³ /Jour
Station de dessalement de Skikda	Skikda	100 000 m ³ /Jour
Station de dessalement de Mostaganem	Mostaganem	200 000 m ³ /Jour
Station de dessalement de Chatt El Hilal	Oran	200 000 m ³ /Jour
Station de dessalement de Cap Djinet	Boumerdes	100 000 m ³ /Jour
Station de dessalement de Douaouda	Tipaza	120 000 m ³ /Jour
Station de dessalement de Oued Sebt	Tipaza	100 000 m ³ /Jour
Station de dessalement de Beni Saf	Ain Temouchent	200 000 m ³ /Jour

1.3.2. Les problèmes du secteur des ressources en eaux

Le nord Algérien est caractérisé par un relief montagneux avec trop de pentes supérieures à 25%, une nature lithologique des sols composée généralement des schistes et des argiles sensibles à l’érosion (Diab, D. I. 2013).

Le climat varie entre semis arides au nord et aride au sud caractérisé par une alternance des saisons sèches de longue durée et d'autres humides de courte durée (crues soudaines, crues éclaires) (Remini, B. 2019), cette situation rend l'Algérie et spécialement l'ouest du pays exposé au phénomène d'érosion (Hafied, Y. 2021).

Plusieurs organisations et chercheurs locaux et mondiaux ont tiré la sonnette d'alarme sur l'avenir des ressources hydriques des pays Maghrébins qui sont actuellement en danger, et ils ont proposé tant de solutions afin de suffire les habitants par cette matière vitale.

L'Algérie a été classée par la banque mondiale dans la catégorie des pays les plus pauvres en potentialités hydriques, vu que la moyenne mondiale de dotation par habitant est de 6000 m³/An par contre en Algérie que 292 m³/An est disponible (Guergueb, M. 2021).

Le Tableau 1.7 montre la diminution de la dotation annuelle en Algérie disponible par habitant entre 1962 à 2000, et qui a été divisée par 3 passants par 1500 m³/Hab/An à 500 m³/Hab/An (Guergueb, M. 2021).

Tableau 1.7- Dotation annuelle en eau par habitant en Algérie (Guergueb, M. 2021).

Années	1962	1990	1995	1998	2000	2020	2030
m ³ /Hab/An	1500	720	680	630	500	430	-

Note : L'unité m³/Hab/An : Mètre cube/ Habitant /An.

Les spécialistes du domaine d'hydraulique s'accordent que les pays du Maghreb dans les années qui arrivent connaîtront des problèmes de manque d'eau (Diab, D. I. 2013).

Ce manque est dus à plusieurs causes, en premier lieu il est à saisir que les pluies avec le temps deviennent de moins en moins disponibles, et diminuent de l'Est en Ouest du Nord en Sud (Guergueb, M. 2021).

Au Nord du pays, l'Ouest de l'Algérie est le plus touché par la pénurie de cette matière vitale. Une moyenne de 260 mm /An est disponible pour cette zone contre 560 mm /An à l'Est Algérien, une moyenne nationale de précipitation de 89 mm/An (Guergueb, M. 2021).

Il existe trois principaux phénomènes causent des pertes des quantités considérables en eaux superficielles stockées à savoir : l'évaporation de l'eau, l'envasement des retenues de stockage et les fuites d'eau (Benfetta, H. 2016).

L'Algérie enregistre les valeurs les plus élevées en monde des quantités des boues érodées (Remini, B. 2019).

Dans cette partie du travail on s'intéresse au problème d'envasement des retenues, les quantités des sédiments disponibles, les causes de ce phénomène et les solutions proposées par les chercheurs pour la lutte contre ce problème.

1.3.2.1. Erosion des bassins versants en Algérie

L'érosion est un phénomène physique provoquant le déplacement des particules après arrachage dû à des forces naturelles appliquées par le vent ou l'eau de pluie ou par l'être humain (Travaux etc.), causant une détérioration de la structure du sol (Figure 1.9) ce qui se traduit à l'incapacité de produire une couche de sol arable (Kara, B. 2014).



Figure1. 9- Erosion des sols de Hammam Ouarka (Remini, B. 2013).

Plusieurs paramètres ont joué un rôle négatif sur la capacité des sols de résister au phénomène d'érosion et l'arrachement des particules à savoir : la sécheresse, la fragilité des sols (les schistes et les argiles en général), la morphologie du terrain (pentes qui favorisent les ruissellements), le manque de couverture végétale sur les bassins versants et les feux qui touches les forêts (Remini, B. 2011, Diab, D. I. 2013, Remini, B. 2019).



Figure 1. 10- L'érosion des sols aux monts de Beni Chougrane a l'amont du barrage de Fergoug (Kara, B. 2014).

Après une longue saison de sécheresse une courte durée connaissant de grandes quantités de pluies fortes pluies (pluies éclairs) sur un sol déjà dégradé avec une faible couverture végétale, ce qui facilite l'arrachage des particules et transportés par l'eau selon un sens d'écoulement gravitaire (Figure 1.10).

1.3.2.2. Envasement des barrages

L'envasement des barrages est un phénomène naturel résultant de l'érosion des sols constituant le bassin versant par les eaux pluviales, ces particules solides minérales et organiques sont transportées par charriage, suspension ou ruissellement lorsque la vitesse de l'écoulement est grande (Figure 1.11), une fois ou l'écoulement réduit sa vitesse ces sédiments sont déposés par décantation au fond des retenues (Figure 1.11) (Kara, B. 2014).

Les produits d'envasement sont en général des particules fines (Argiles et limons) ou parfois grossiers (sables) transportés par les eaux pluviales (courant densité) généralement et s'accumulent dans des zones hydro-dynamiquement calmes comme les barrages et les retenues (Figure 1.11) (Bekhti, M. A. 2019).

Cette situation est très délicate et avec le temps cause plusieurs problèmes tels que la réduction de la capacité du stockage, blocage des vannes, le phénomène d'Eutrophisation, la sédimentation des canaux est d'influencer négativement la sécurité de l'ouvrage et même des problèmes de stabilité de l'ouvrage.

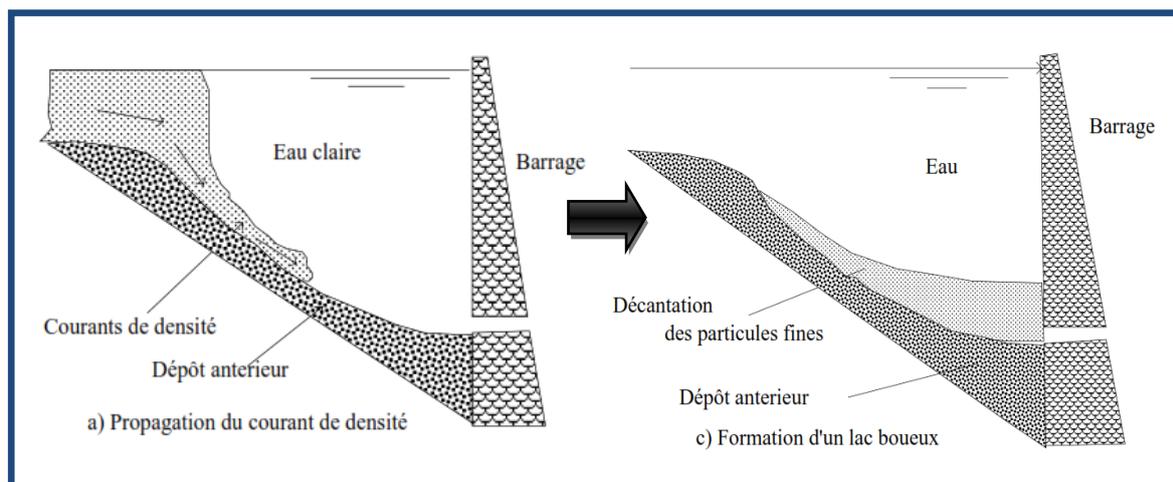


Figure1. 11- Mécanisme de sédimentation (Remini, B. 2003).

Plus de 50 000 barrages dans le monde sont menacés par le phénomène d’envasement selon le comité international des grands barrages (CIGB), ce qui cause une réduction dans la capacité de stockage des retenues, provoque des problèmes de stabilité de ces barrages et influents négativement la qualité et la quantité de l’eau potable, au même temps une dégradation des sols constituant le bassin versant (Kara, B. 2014).

Les pays Maghrébins connaissant un taux d’envasement très élevé vu le climat sec une longue durée de sécheresse et des pluies brusques en automne dévastateur sur des sols des bassins versants sans couverture végétale suffisant ce qui diminue leurs résistances contre l’érosion (Remini,B. 2003).

En Algérie, sur les 80 barrages disponibles 14 sont connaissant un envasement très avancé et pour conserver leurs capacités de stockage le service gestionnaire des barrages ANBT doit régulièrement prendre en considération des travaux d’entretien des ouvrages hydrauliques que ce soit par dévasement par dragage ou par soutirage par les vannes de vidanges.

Note : Les deux techniques les plus utilisés sont le dragage des sédiments et le soutirage du courant densité.

L’Algérie enregistre les valeurs de sédimentation des barrages les plus élevées dans le monde soit 5000 Tonne/Km², mais spécialement deux zones connaissant à très forts taux d’envasement situés dans le nord-ouest et au centre du pays comme montré dans la Figure 1.12, (Remini, B. 2011).

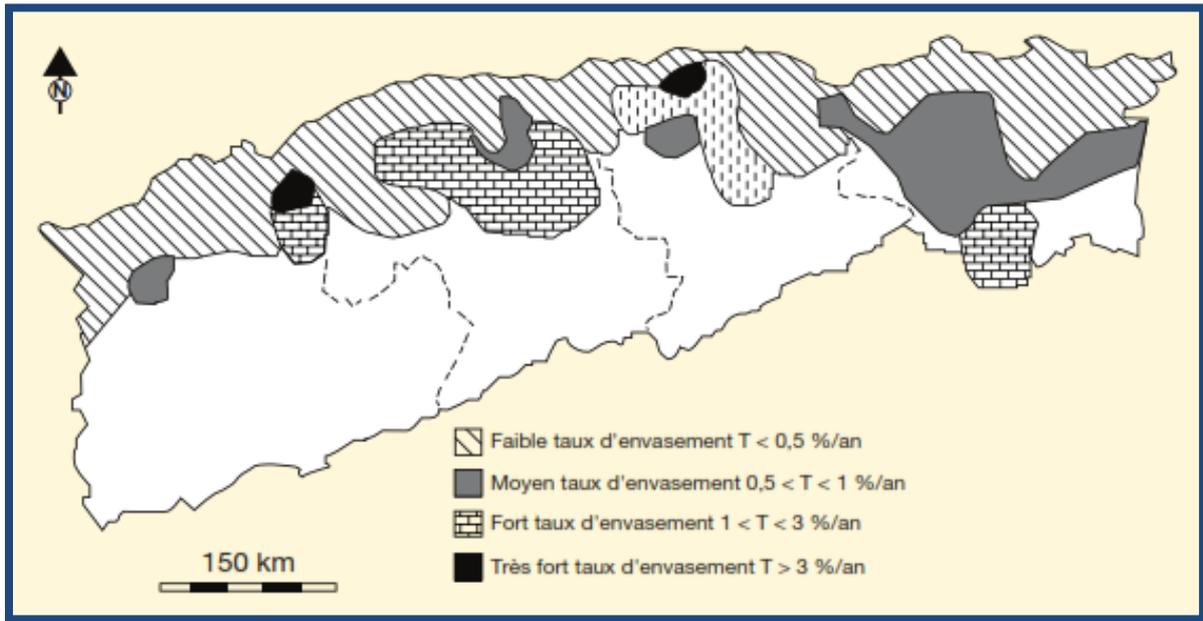


Figure1. 12- La carte de sensibilité à l'envasement d'Algérie (Remini, B. 2019).

Si les mesures nécessaires ne vont pas être prises, le barrage Beni Harroune la source hydraulique la plus importante en Algérie perd la totalité de sa capacité de stockage de 106 ans de son dernier levé batimétrique selon une estimation effectuée par (Toumi, A. 2018).

REMINI,B. 2019 a reporté que la quantité des apports solides dans les cours d'eau du nord Algérien estimée par la concentration des eaux chargées par les particules varie entre 50 à 150 g/l.

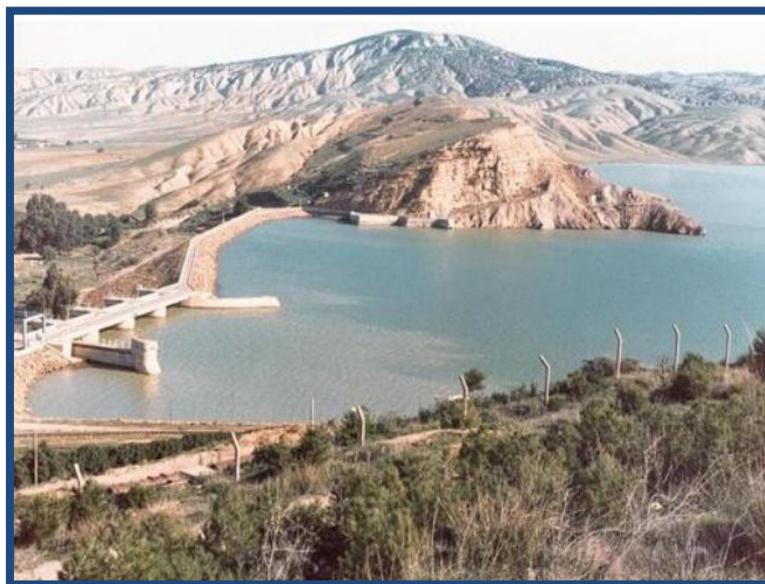


Figure1. 13- État d'envasement de barrage Fergoug 90% en 2008 (Kara, B. 2014).

En Algérie, 180 millions m³ de sédiments transportés par les cours d'eau, 1.6 milliards de mètres cubes se trouvent au fond de l'ensemble des barrages en cours d'exploitation, 20 barrages connaissant un état d'envasement très avancé et des estimations parlent de 120 millions m³ supplémentaire déposé annuellement au fond des barrages (Remini, B. 2019).

L'envasement des retenues est plus rapide que les quantités de la vase récupérée par les travaux et les techniques d'entretien (Diab, D. I. 2013).

En 1980 vingt Millions Tonnes de sédiments ont été dévasés, en 1990 trente-cinq millions Tonnes, et en 2000 quarante cinq Millions Tonnes ont été dévasés, l'Algérie perd annuellement 0.65% de sa capacité totale de stockage d'eau a cause de ce problème (Diab, D. I. 2013).

Deux barrages d'une capacité importante ont été déclassés à cause des problèmes d'envasement dans la même région nord-ouest du pays à savoir barrage Fegoug II qui a été mis en service en 1871 avec une capacité de 30 millions m³, et barrage Chorfa I qui a été mis en service en 1882.



Figure1. 14- La boue au fond du lac de Fergoug (Remini, B. 2014).

Les deux barrages (Fergoug II et Chorfa I) ont été remplacés par deux autres barrages Fergoug III en 1970 avec une capacité de stockage de 18 millions m³ et barrage Chorfa II en 1992 avec une capacité de 82 millions m³ (Diab, D. I. 2013).

Les Figures 1.13 et 1.14 montrent l'état d'envasement avancé de barrage Fergoug situé à la wilaya de Mascara, et qui a connu des travaux de dévasement plusieurs fois avec des millions de mètres cubes de sédiments déposés à l'amont.

1.3.3. Techniques de lutte contre l'envasement des barrages

1.3.3.1. Dragage des sédiments

La technique de dévasement des barrages par dragage est une technique efficace et connue, se fait par plusieurs types d'engins (dragues, pelles flottantes ou sur appuis) ça permet d'une extraction mécanique des déchets solides des fonds des barrages ensuite transportés vers l'extérieur du barrage pour stockage (Semcha, A. 2006).

Le dragage en eau, le dragage hydraulique, dragage pneumatique ou dragage mécanique sont des techniques existantes utilisées par les services d'entretien des barrages afin de reprendre la capacité initiale du stockage des réservoirs (Safer, O. 2018).

D'un autre côté ces opérations de dragage sont très coûteuses vu l'opération délicate nécessitant des moyens humains qualifiés ainsi que des moyens matériels spécifiques durant toute l'opération d'extraction, pour cela l'État Algérien compte renforcer les moyens d'entretien des barrages des services de l'ANBT par des dragues pour l'entretien périodique des barrages (ANBT).

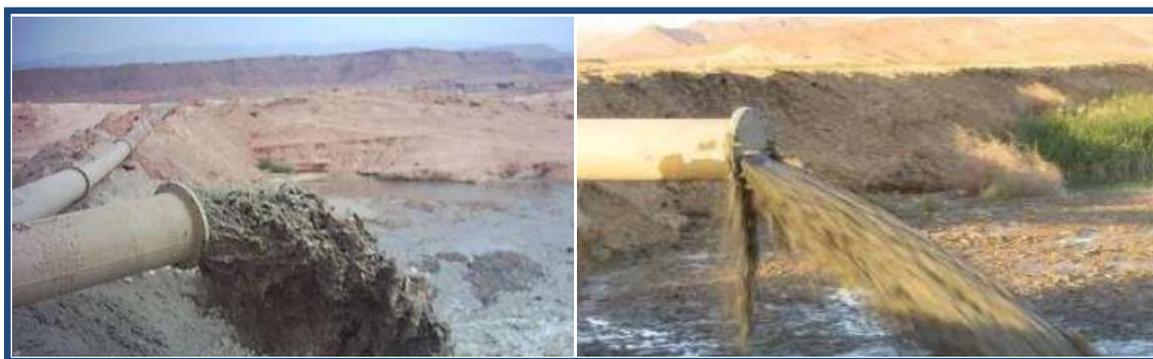


Figure1. 15- Dragage de barrage de Foug el Gherza (Remini, B. 2005).

Aussi, il a été noté par plusieurs chercheurs les difficultés que connaissent les services d'entretien des barrages en Algérie pour la gestion des déchets de stockage (les sédiments de dragage) avec des quantités énormes et ils ont opté de prévoir des solutions techniques et pratiques pour la gestion de ses déchets surtout après avoir été jugés réutilisables surtout dans le domaine des matériaux de construction (Ciments et Briques).

Les barrages Algériens ont fait l'objet de plusieurs interventions d'entretien curatives par dragage des sédiments en plusieurs occasions (Remini, B. 2019).



Figure1. 16- Dragage de barrage el Merdjet Sidi Abed (REMINI,B. 2005).

Huit barrages ont été au rendez-vous pour dragage et récupération de la capacité de stockage, entre 1958 à 1969 10 millions m³ a été dévasé de barrage Chorfa I, 8 millions m³ de barrage Hamiz (Remini, B. 2019).

Pour la période entre 1989 à 1992: 7 millions m³ de barrage Fergoug III et 10 millions m³ de barrage Zéraldas (Remini, B. 2019).



Figure1. 17- Dragage de barrage Bouhnifia en juin 2013 (Remini, B. 2015).

En 2013 plusieurs barrages ont eu lieu d'une opération de dragage à savoir : barrage Foum el Gherza par 4 millions m³ (Figure 1.15), Merdjet Sidi Abed par 5 millions m³ (Figure 1.16) Fergoug III par 7 millions m³ avec un total des opérations connues de 70 millions m³ depuis 1950 (Remini, B. 2019).

Aussi le barrage de Bouhnifia a fait l'objet d'une opération de dragage en juin 2013 pour récupérer la capacité de stockage du barrage et qui a résulté l'extraction de plus de 6 millions mètres cubes de déchets solides (Figure 1.17) (Guessas, H. 2014).

1.3.3.2. Soutirage des courants de densité

La technique de soutirage des courants densités aussi est une technique de fiabilité importante qui a été utilisés par les services d'entretien des ouvrages hydrauliques Algériens à savoir ANBT, et qui a résulté des quantités de vase de 40 millions m³ depuis 1950 (Remini, B. 2019).

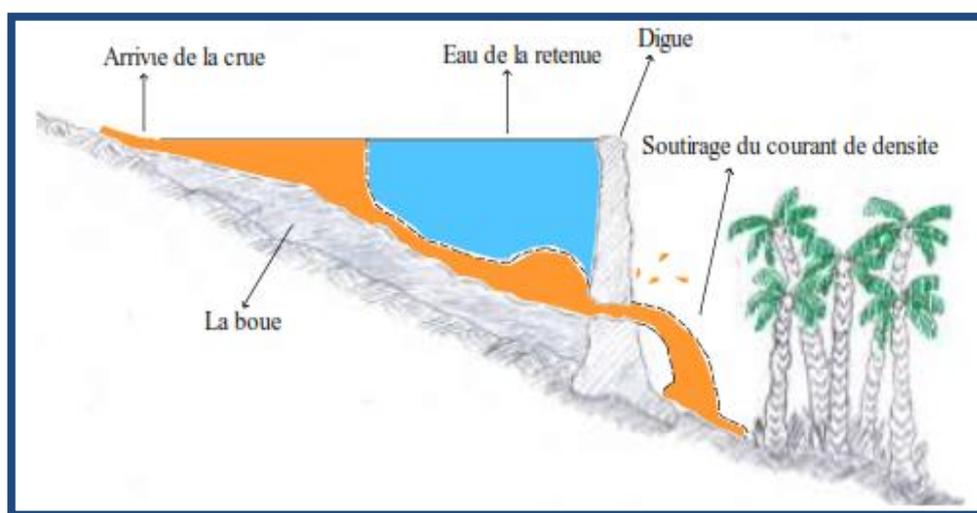


Figure1. 18- Soutirage du courant densités par les pertuis de vidange (Remini, B. 2019).

Remini, B. en 2019 a défini cette technique comme une méthode efficace permettant le soutirage des courantes densités par des pertuis de vidange, et qui constitue une très bonne technique pour diminuer les quantités des fines dans les barrages qui se déplacent au-dessous des eaux claires pour atteindre le pied de l'ouvrage (Figure 1.18, Figure 1.19).

Et le même auteur a cité aussi que cette technique est plus simple et efficace que les autres méthodes et ce par équiper les barrages par des vannettes de dévasement comme montré dans la Figure 1.20.



Figure1. 19- Cas réel des vannettes de vidange (REMINI, B. 2019).

Les Figures 1.21 et 1.22 montrent des photos des barrages utilisant la technique de soutirage des courants densités pour l'entretien périodique des barrages à savoir barrage Zeraldas, barrage Ighil Emda, et Beni Harroun.



Figure1. 20- Soutirage des courants densité sur Barrage Zeraldas (Remini, B. 2019).

À titre d'exemple une batterie de huit vannettes de 40 cm de diamètre a été installée dans le corps du barrage D'Ighil Emda pour le soutirage des courants de densité (Figure 1.22). Et cette technique a permis la récupération de plus de 100 millions mètres cubes de vase au niveau des barrages Ighil Emda et Oued el Fodda.



Figure1. 21- Opération de soutirage des courants densités au niveau de barrage d'Ighil Emda (Remini, B. 2019).

Diab Djefal Imane, 2013 a noté la récupération de 3 millions m³ au niveau du Barrage de Beni Amrane par la technique de chasse des sédiments par la vanne des fonds, par contre cette technique a été essayée sur le barrage Oued el Fodda et qui n'a pas réussi.

Ces sédiments posent un vrai problème pour les gestionnaires de l'agence nationale des barrages et de transfert ANBT en matière des endroits de dépôt.



Figure1. 22- La suspension soutirée par les pertuis de vidange du barrage de Beni Haroun (Remini, B. 2019).

I. 4. Conclusion

Comme vu dans le présent chapitre, la vase des barrages est un déchet naturel renouvelable du secteur hydraulique disponible en quantités énormes (1.6 milliards de mètres cubes et une augmentation annuelle de 120 millions m³) et qui présente un vrai souci préoccupant les services d'entretien des barrages en Algérie réduisant la quantité et la qualité de l'eau potable, ce qui nécessite une volonté par les responsables de haut niveau pour une prise en charge de ce problème visant conserver les ressources hydriques du pays et de suffire les besoins de la population en cette matière vitale. Pour cela il est temps d'introduire des stratégies efficaces pour l'utilisation de ces déchets dans un domaine prometteur tel que la production des ciments ce qui va permettre aussi à stopper l'épuisement des ressources naturelles non renouvelable et de réduire le taux du clinker dans les ciments.

Chapitre II: La vase calcinée en tant qu'addition partiellement substituable au ciment

Chapitre II : La vase calcinée en tant qu'addition partiellement substituable au ciment

II. 1. Introduction

Dans l'avenir, les responsables sur l'industrie de production des ciments doivent chercher des nouveaux matériaux pour suffire les besoins en matières premières et de répondre aux quantités de production en augmentation d'une part. D'autre part, de respecter les exigences mondiales en matière de dégagement de CO₂ et de consommation d'énergie (Newman, J. 2003, Fabiani, C. 2018). La plus fiable alternative de court terme pour réduire les émissions de CO₂ dus à la production du clinker est d'encourager l'utilisation des additions partiellement substituables au ciment (APSC) (Almenaressa, R. S. 2017) ce qui va permettre de diminuer le rapport du clinker dans l'usinage des ciments.

En Algérie, peu d'informations et de données sont disponibles sur les quantités des ressources naturelles et des déchets industriels destinés pour utilisation cimentaire. Mais au même temps, tous les rapports existants assurent que les quantités des déchets industriels sont en diminution et que les ressources naturelles non renouvelables sont en voie d'épuisement, la Société de Pouzzolane et des matériaux de Construction-Algérie «SPMC» estime que les quantités de la pouzzolane naturelle dans gisement de Beni Saf Tlemcen (le plus important gisement en Algérie) dépassant les 18 millions mètre cube avec une production annuelle près de 500 000 Tonnes/An (Journal, Liberté. 2010). Zemouli, S. 2018 a noté qu'une quantité de 500 000 Tonnes/An de laitier issues de la fabrication des métaux est réservée chaque année en Algérie pour ce domaine d'utilisation. Guenanou, F. 2019 parle de 350 000 Tonnes de perlite estimées dans les principaux gisements de perlite en Algérie dont l'existence d'un gisement important à Hammam Boughrara.

Pour s'adapter à cette situation délicate il est à insister de chercher des nouveaux matériaux pour utilisation en tant que APSC. Surtouts après la diminution des déchets industriels tels que les cendres volantes et les matériaux qui peuvent jouer le rôle pouzzolanique dans les ciments, il a insisté sur l'utilisation des agriles calcinés comme des

nouveaux matériaux pouzzolaniques pour remplacer les ajouts pouzzolaniques utilisés dans le passé (Jaskulski, R. 2020).

Ce chapitre récapitule les compétences techniques nécessaires relatives au sujet « utilisation de la vase calcinée pour la substitution partielle du ciment » dont il est composé de trois parties principales. La première partie représente une étude bibliographique sur l'utilisation des argiles calcinées en tant qu'additions partiellement substituables au ciment, les types des argiles utilisés, la méthode efficace de leurs préparations et les critères techniques recommandés permettant leurs utilisations dans l'industrie du ciment. Le deuxième volet est un bref passage consacré aux ciments, production du clinker, réactions d'hydratation du ciment et réactions pouzzolaniques. La troisième partie est une collecte des travaux de recherche menées précédemment sur la valorisation de la vase calcinée pour la substitution partielle du ciment, une identification technique détaillée sur le matériau suivi des résultats de caractérisation d'utilisation du matériau en tant que APSC dans des pâtes, des mortiers et des bétons à l'état frais et durci ainsi que des essais de durabilité vont avoir lieu.

II. 2. *Les argiles calcinées*

II.2.1. *Définitions*

Les argiles sont des matériaux disponibles pas cher et facile à trouver, caractérisés par leurs finesse avec un comportement plastique, une chute du comportement mécanique en présence d'eau et une augmentation des résistances mécaniques à l'état sec caractérisé par une grande cohésion avec une grande diversité minéralogique, après un traitement thermique elles peuvent être utilisées en tant que APSC (Jaskulski, R. 2020).

Dans l'industrie de production des ciments, les argiles à l'état calciné ont été utilisées depuis la création du ciment portland en 1824 selon le brevet d'invention par Joseph Aspdin où les argiles ont été cuites avec le calcaire sous une température avoisinant les 1450°C pour obtenir du clinker composant essentiel du ciment (Newman, J. 2003).

Dans le présent chapitre on ne traite que les argiles calcinées avec des températures inférieures à celles utilisés dans la production du clinker (1450°C) pour utilisation en tant que APSC (matériaux pouzzolaniques), d'une façon à réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ dans l'atmosphère.

Note : Le matériau pouzzolanique est un matériau silicieux ou alumineux qui peut avoir peu ou aucune valeur cimentaire réagit avec les hydrater de ciment tel que la chaux libre et la portlandite pour produire des calciums silicate hydratés C-S-H (ASTM, C125).

Les argiles calcinées ont été décrites par plusieurs chercheurs comme les matériaux les plus prometteurs dans l'avenir pour utilisation pour le remplacement partiel du clinker (Kang, S. H. 2022).

Le Metakaolin a été jugé comme le meilleur minéral à utiliser en tant que APSC après traitement thermique, mais réellement la forme pure n'existe que dans un nombre limité et dans la majorité des cas l'existence des impuretés est indispensable (Jaskulski, R. 2020).

II.2.2. Les types d'argiles

Pour détailler les connaissances sur les types d'argiles existantes, il faut aborder les types de structures atomiques formant la majorité des argiles (70% à 80%), qui sont formées principalement des deux couches tétraédriques (T) ou octaédriques (O).

Les deux types d'argiles les plus connus dans la littérature sont les minéraux des types 1:1 et 2:1, formés des couches répétitives de structures atomiques tétraédriques (T) et d'autres octaédriques (O) (Figure 2.1 et 2.2).

Donc les argiles se divisent en deux groupes 1:1 sont d'une structure type TO (Figure 2.1 et 2.2) et groupe 2:1 d'une structure type TOT (Figure 2.3 et 2.4) (Jaskulski, R. 2020).

II.2.2.1. Argiles type 1:1 (Structure TO)

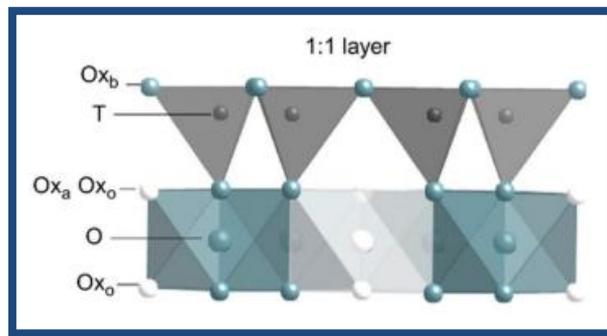


Figure 2. 1- Modèle des argiles groupe 1:1 type de structure TO (Jaskulski, R. 2020).

Les minéraux du type 1:1 incluent deux groupes: le groupe Kaolinite (Figure 2.5) et le groupe Serpentine, le groupe Kaolinite inclut: Kaolinite, dickite, nicrite, halloysite, hisingérite, et le deuxième groupe contient : lizarde, antigorite, chrisotite, caryopilite, pyrosmalite, serpentine polygonale est serpentine polyhedral (Jaskulski, R. 2020).

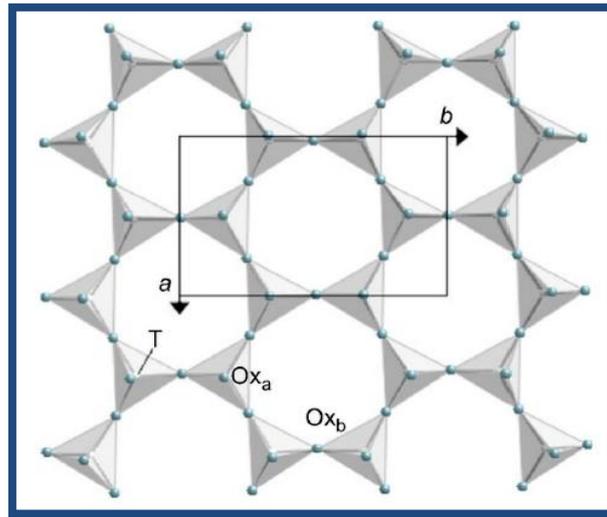


Figure 2. 2- Structure tétraédrique (T), Cation tétraédrique (Jaskulski, R. 2020).

II.2.2.2. Argiles type 2 :1 (Structure TOT)

Les minéraux 2:1 regroupe un plus large nombre de types et les plus importants sont: Pyrophyllite, Talc, Mica, Muscovite, Illites, Smectite, Montmorillonite, Vermiculite, Chlorites, et sa existent des minéraux avec une structure contiennent un mélange de couches Illite- Smectite, Chlorite-Smectite, Illite-Chlorite (Jaskulski, R. 2020).

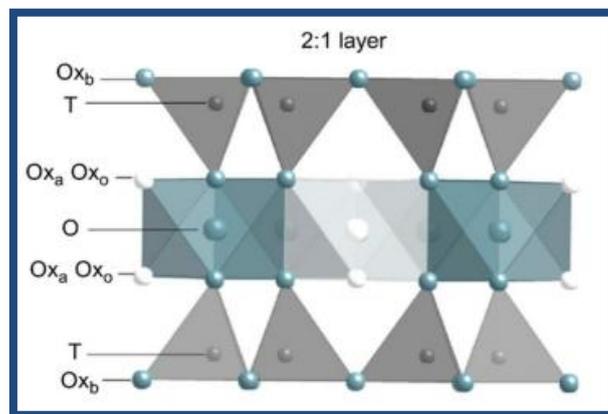


Figure 2. 3- Modèle des argiles groupe 2:1 type de structure TOT (Jaskulski, R. 2020).

Lorsque l'argile est riche en kaolinite et subit un traitement thermique, elle change d'état et se convertit au Metakaolin avec une structure amorphe ce qui la rend l'argile la plus apte pour utilisation en tant qu'addition partiellement substituable au ciment très prometteur dans ce domaine d'utilisation (Abraham, T. 2016).

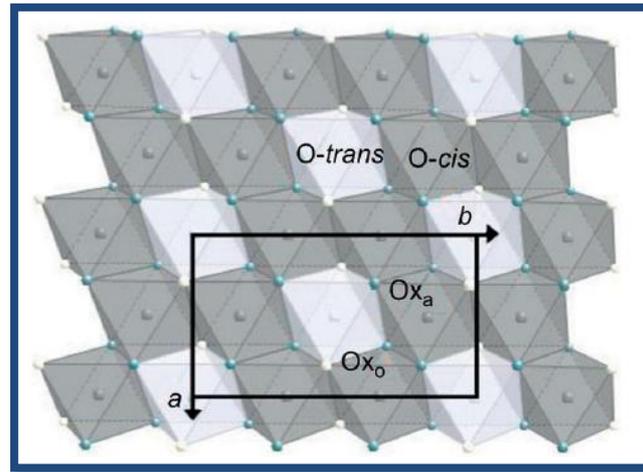


Figure 2. 4- Structure octaédrique (Jaskulski, R. 2020).

Aussi, il existe d'autres types d'argiles connus tels que l'illite (Figure 2.6) et la Muscovite, qui sont des types d'argile qui peuvent être utilisées dans ce domaine après calcination mais avec une faible activité pouzzolanique par rapport au Métakaolin (Figure 2.5), mais l'illite est plus active que la Muscovite (Jaskulski, R. 2020).

II.2.3. Les Argiles les plus connus (caractéristiques)

L'illite n'est pas active à l'état naturel, le traitement thermique entre 930°C à 950°C améliore son activité pouzzolanique, la température de désoxydation de cette argile est plus faible car la désoxydation totale n'est pas suffisante pour la destruction de la structure cristalline, une partie des structures amorphes se recristallise au même moment ce qui réduit l'activité pouzzolanique de l'illite par rapport à la kaolinite (Jaskulski, R. 2020).

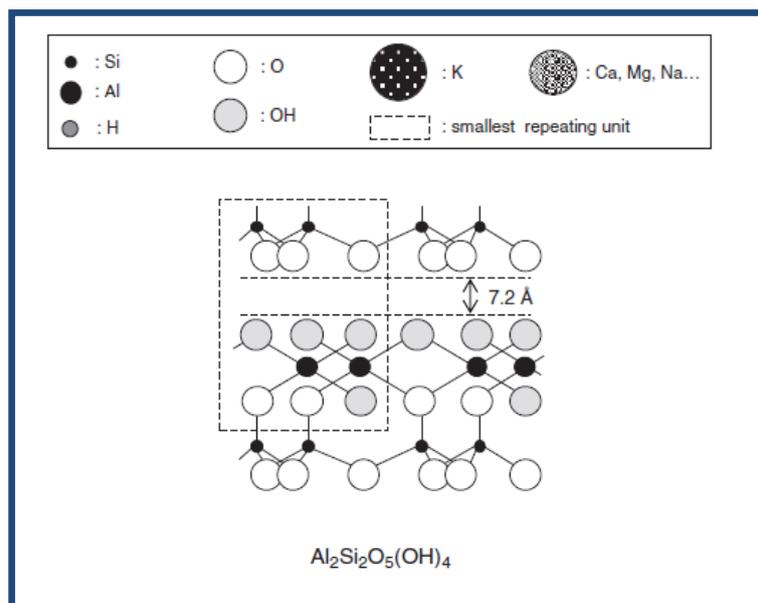


Figure 2. 5- Structures atomique de la kaolinite (Rodrego. F, 2011).

Après examen de plus de 6000 échantillons d'argile aux États-Unis de l'Amérique, il a été noté que plus de 70% de ces échantillons contenant une variété des types de structures 1: 1, 2: 1, avec des mélanges de couches (Jaskulski, R. 2020).

Des analyses thermogravimétriques ont été conduit sur plusieurs types d'argiles d'une façon a déterminer les températures de désoxydation et il a été noté ce qui suit: désoxydation de la kaolinite entre 400–600 °C, 450–700 °C pour l'illite, 600–800 °C pour la montmorillonite et 500–900 °C pour la désoxydation de la pyrophyllite (Hanein, T. 2022).

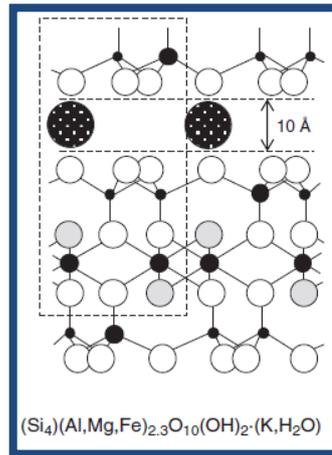


Figure 2. 6- Structures atomique de l'illite (Rodrego, F, 2011).

La Montmorillonite (Figure 2.7) aussi est un type d'argile qui est caractérisé par une activité pouzzolanique à son état naturel et même à l'état calciné surtout quand il est traité thermiquement au-delà de 800°C, mais d'une activité meilleure à l'état naturel. La plus faible activité pouzzolanique des argiles à l'état naturel est celle de la Muscovite (Jaskulski, R. 2020).

Ça existe d'autres types d'argiles qui sont moins réactifs où rarement discutés dans la bibliographie pour le même domaine d'utilisation comme le sepiolite, Halloysite (dite la cousine de la kaolinite, la seule différence que celle-ci contient deux molécules additionnelles que la kaolinite à l'état déshydrater appelé métahalloysite), mais vus la rareté des recherches effectuées sur ces argiles ces types sont méconnus (Jaskulski, R. 2020).

La différence entre ces types d'argile est l'état de la structure atomique plus elle est amorphe plus elle est plus réactive, les argiles types de structure TO (1: 1) tel que la Kaolinite présente la plus simple structure après traitement thermique entre 600°C à 800°C elle devient plus amorphe donc plus réactive, mais d'autres de type de structure TOT (2:1) tels que l'illite et la Montmorillonite nécessitent une température de calcination plus élevée.

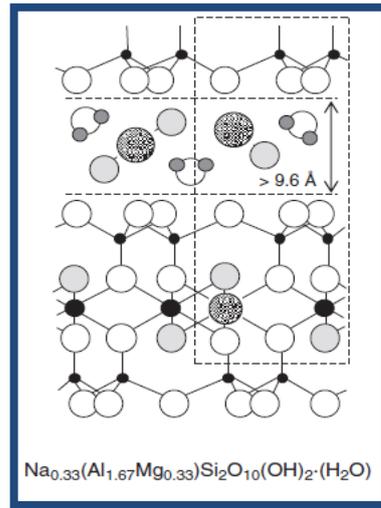


Figure 2. 7- Structures atomique de la Montmorillonite (Rodrego, F, 2011).

À 800°C la Kaolinite et l'Illite présentent une perfection en matière d'activité pouzzolanique mais celle de la Muscovite reste plus faible à cette température de calcination (Jaskulski, R. 2020).

Les argiles du groupe 2:1 structure atomique (TOT) nécessitant une température de calcination plus importante de l'ordre de 800°C à 950°C, L'élaboration des mélanges Illite (Càd Mica) avec la montmorillonite (Smectite) (70% Illite +30% Smectite) résultant un matériau de classe 3:1 à 2:1, les études sur ce matériau montrent que ce minéral après calcination de 960°C est caractérisé par une bonne activité pouzzolanique, avec un indice d'activité pouzzolanique de 113 % par rapport à un mortier contenant le ciment portland seul (Jaskulski, R. 2020). Aussi, des mélanges de deux et parfois trois types d'argiles en tant que APSC ont été utilisés (Shi, X. 2022, Hamadache, M. 2018).

II.2.4. Processus de calcination des argiles

Cette partie du chapitre résume la compréhension du processus de calcination des argiles ainsi que les explications de l'augmentation de l'activité pouzzolanique d'une argile après traitement thermique, qui sont variables d'un type d'argile à un autre.

Le procédé de calcination est de mettre l'argile sous une température élevée dans des fours de calcination pendant une période bien déterminée (variable selon le type d'argile à calciner), plusieurs types de traitement thermique sont utilisés sur les argiles pour leurs utilisations en tant qu'addition partiellement substituable au ciment (Hanein, T. 2022).

Pendant la calcination les matériaux type Silico-Aluminate exposés aux hautes températures passent par trois étapes essentielles à savoir: la déshydratation (entre 80°C à

300°C), la désoxydation (entre 400 à 900°C) et la recristallisation (à une température supérieure à 850°C) (Figure 8) (Hanein, T. 2022).

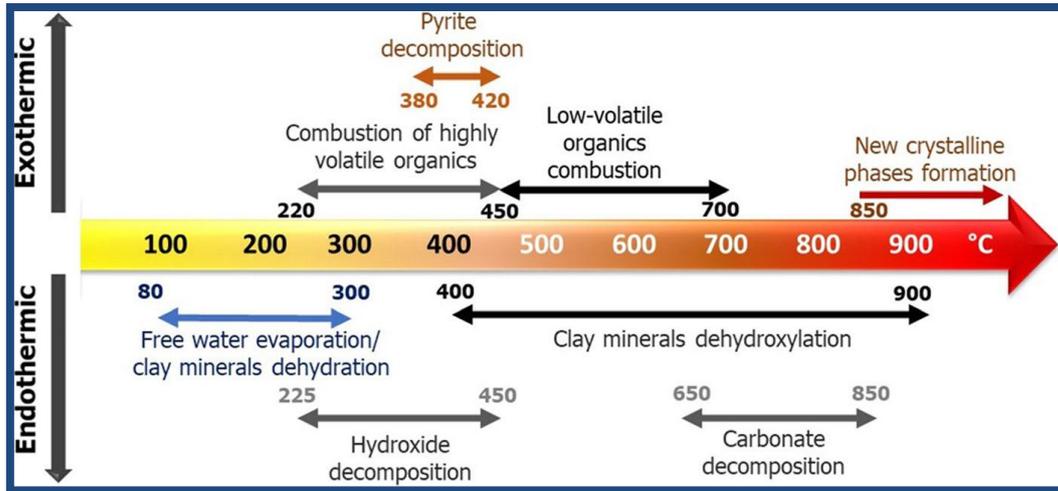


Figure 2. 8- Rang des réactions en fonction de la température pendant la calcination des argiles (Hanein, T. 2022).

Il est connu que la Kaolinite avec une structure atomique type TO perd facilement sa cristallinité aux hautes températures et devient amorphe ce qui la rend réactive avec l'hydroxyde de calcium (Kang, S. H. 2022).

La Formule 1 présente la réaction chimique de déshydratation et désoxydation de la kaolinite qui se transforme en Metakaolin.



Les minéraux avec une structure moins cristalline nécessitent une faible température et désoxydation ce qui facilite sa décomposition et la rend partiellement désordonnée (structure non rigide) et réactive avec les hydrater du ciment, par contre la structure cristalline et plus ordonnée est moins réactive (Hanein, T. 2022).

Majeurs changements dans la composition des Al et Si dans structure cristalline de l'argile calcinée est confirmée lorsque la température de calcination est augmentée au-delà des 600°C et un taux de désoxydation de 95% de lorsque la température atteint les 800°C (Hanein, T. 2022).

Dans la majorité des cas il existe certaines impuretés dans l'argile, telles que le quartz et feldspath qui restent généralement non convertis et non interférer avec le processus de calcination (Hanein, T. 2022).

Pour favoriser une calcination uniforme et complète de l'argile, la température utilisée dans l'industrie est nécessairement supérieure à ce qui est théoriquement requis et

supérieur à celle-ci utilisée en laboratoire où beaucoup plus petites quantités de matière sont calcinées (Hanein, T. 2022).

Il a été rapporté que la température industrielle idéale pour la calcination de la Kaolinite est entre 700°C à 850°C, mais souvent les températures utilisées dans la calcination au four atteignent jusqu'à 900°C dans une durée de 30 Minutes dans la zone de combustion, pour atteindre la calcination quasi complète (Hanein, T. 2022).

D'autre part, il est également suggéré de rester au-dessous de la température de décomposition du calcaire (CaCO_3) lors de la calcination de la Kaolinite (Hanein, T. 2022).

Généralement les argiles sont calcinées dans des fours rotatifs pour permettre la bonne distribution de la chaleur sur l'argile calcinée, mais ça existe plusieurs d'autres types de calcination à savoir « Le flash calcination » ou la technique dite « Lit fluidisé » (Almenares, R. S. 2017).

Le flash calcination est de faire exposer la poudre d'argile à une température élevée pour une courte durée (généralement 0.2 à 1 seconde), le produit du flash calcination est caractérisé par une diminution de densité et des changements dans la structure de l'argile comme l'apparition des vides internes causés par la rapide évaporation de l'eau (Abraham, T. 2016).

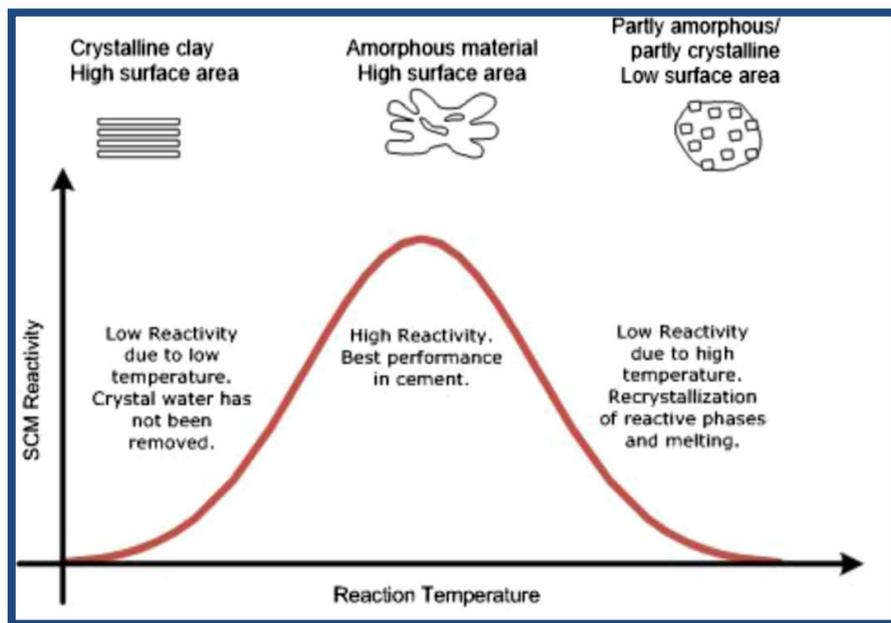


Figure 2. 9- Illustration montrant l'importance du contrôle de la température dans la calcination de l'argile (Hanein, T. 2022).

La minéralogie et les conditions de calcination des argiles calcinées sont essentiellement influencées par le taux de disponibilité de la silice et l'alumine pour la réaction pouzzolanique (Roland, P. 2015).

Il a été démontré qu'il existe un potentiel par l'augmentation de la résistance à la compression des ciments pouzzolaniques par un ajustement chimico-minéralogique de l'argile calcinée, du clinker et de l'agent sulfate (Roland, P. 2015).

Le respect de la température de calcination notamment celle de la désoxydation est nécessaire car un dépassement de cette température conduit la recristallisation ce qui rend le matériau inactif à nouveau comme montré dans les courbes (la Figure 2.8) accompagnée d'une diminution de la surface spécifique (Figure 2.9).

La variation des dimensions et de densité de particules d'argiles lors de l'opération de calcination dans un four rotatif peut conduire à la ségrégation des particules pour former un noyau interne (effet Haricot), qui peut inhiber une calcination uniforme (Figure 2.10) (Hanein, T. 2022).

Le contrôle de la température dans la zone de combustion d'un four rotatif n'est pas anodin et peut avoir un impact sur la qualité de l'argile selon le temps de séjour et peut provoquer une agglomération et générer des grumeaux (Figure 2.10) (Hanein, T. 2022).

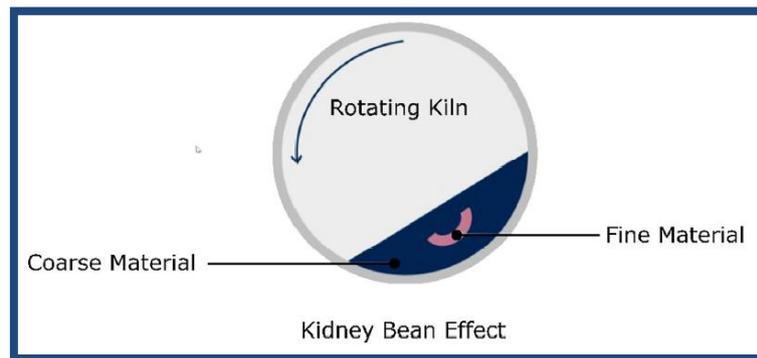


Figure 2. 10- Effet Haricot dû aux variétés des densités des particules lors de la calcination (Hanein, T. 2022).

La couleur du minéral produit lors de la calcination aussi peut être contrôlée car la couleur rougeâtre ou d'autres qui ne correspondent pas à la couleur conventionnelle du ciment portland commercial n'est pas bien acceptée et même parfois les ciments de différentes couleurs sont de mauvaise qualité (Chotoli, F. F. 2015).

La variation des couleurs des argiles est le résultat des impuretés non organiques dues aux changements dans l'état d'oxydation des éléments chimiques tels que le Fer, le Titanium le Manganèse présent largement dans les minéraux argileux, ce qui influe directement les propriétés des couleurs (Chotoli, F. F. 2015).

Donc il est possible de produire un matériau pouzzolanique à l'échelle industrielle par le biais d'une installation nouvelle spécialisée pour la production des argiles calcinées ou

par l'utilisation des équipements disponibles dans l'industrie du ciment déjà utilisé pour la production du clinker (Almenaresa, R. S. 2017).

II. 3. Utilisation en tant que APSC

Avec le temps, l'intérêt de l'utilisation des matériaux pouzzolaniques pour la substitution partielle au ciment augmente, ce qui a conduit à une augmentation de demande pour le développement des essais pour mesurer l'activité pouzzolanique de ces minéraux (Anuj, P. 2022).

Ça existe plusieurs essais pour la détermination de l'activité pouzzolanique des matériaux tels que LR teste de résistance à la compression, chaux (rapport chaux/ hydroxyde de calcium (CH)), le test standardisé LR et le test R3, mais résistance à la compression des mortiers le meilleur indicateur de pouzzolanité (Anuj, P. 2022).

Trois paramètres essentiels pour orienter l'utilisation des minéraux en tant que ciments, matériaux pouzzolaniques ou filler à savoir : la finesse, la teneur en silice réactive et le degré de cristallinité (Sales, R. 2017).

Le minéral le plus connu dans ce domaine d'utilisation est le Métakaolin après calcination d'une argile avec une haute teneur en Kaolinite ce qui la rend réactive (Jaskulski, R. 2020), mais comme noté dans la partie II-2 son existence dans la nature à un état pur est limitée et l'existence des argiles dans la nature est généralement des mélanges des types d'argiles.

Ce qui a conduit les chercheurs de travailler sur les matériaux et les déchets locaux disponibles en quantité suffisante pour utilisation en tant que substituant partiels au ciment (Jaskulski, R. 2020).

L'amélioration de la réactivité les argiles calcinées de nature multiples est plus complexe que celle d'un système pur, la composition chimique est minéralogique dans ce cas est hétérogène, les minéraux argileux avec une teneur en Kaolinite associés à d'autres types de minéraux influencent aussi la température de calcination (Almenaresa, R. S. 2017).

Les recherches récentes ont reporté que les minéraux argileux peuvent être quantitativement évalués, par le rapport Al_2O_3/SiO_2 dans son état naturel ainsi que la perte de masse pendant l'opération de désoxydation (Almenaresa, R. S. 2017).

Plusieurs travaux ont été réalisés et montrés que les paramètres nécessaires influent la réactivité des argiles calcinées mise à savoir : la finesse des grains, la teneur en silice et alumine réactive, la température de calcination, l'état de cristallinité de la structure des argiles (la structure amorphe est la plus réactive), le temps de calcination et le type de calcination

aussi plusieurs travaux ont montré que les argiles contenant les hautes teneurs en Kaolinie sont les plus réactives (Christian, R. 2022).

Tous ces paramètres permettant l'augmentation de l'activité pouzzolanique ce qui facilite la consommation des produits d'hydratation du ciment CH et Cao et participent à la production des C-S-H et C-A-H donc l'augmentation de la résistance à la compression.

Au laboratoire ces matériaux pouzzolaniques (argiles calcinées) sont utilisés comme des composants principaux du ciment en tant qu'addition partiellement substituable au ciment avec des taux de remplacement généralement entre 20 à 40% (Roland, P. 2015).

II. 4. La vase calcinée en tant qu'addition partiellement substituable au ciment

II.4.1. Paramètres d'identification

La vase des barrages est une sélection naturelle des particules fines constituant les sols des bassins versants, arrachés par les eaux pluviales ensuite transportés par les cours d'eau jusqu'au fond des retenues, les sédiments s'accumulent au fond de ces retenues par phénomène de décantation lorsque la vitesse de l'eau est devenue lente (Chapitre I).

Cette vase a prouvé après analyse minéralogique par diffraction aux rayons 'X' (DRX) qu'elle contient des minéraux tels que la Kaolinite, la calcite, le quartz et la Moscovite (Figure 2.11) (BELGUESSMIA, K. 2018), le minéral le plus important est la Kaolinite qui est apte à se transformer sous une température entre 600°C jusqu'à 800°C au Métakaolin (Hanein, T. 2022).

L'activité pouzzolanique de la vase est atteinte après traitement thermique de l'ordre de 750°C pendant une durée de 5 heures, après calcination le matériau devient réactif avec les produits d'hydratation du ciment tel que la chaux et l'hydroxyde de calcium (Semcha, A. 2006).

À ce jour, malgré le bail des recherches effectuées sur ce sujet au niveau local aucune cimenterie n'a entamé l'exploitation de ce matériau, ce qui nous oblige à poser la question des causes essentielles qui ont empêché les cimenteries Algériennes l'utilisation de ce matériau dans le domaine de production des ciments.

Les sédiments de dragage des barrages sont généralement des particules de nature argileuse caractérisée par une grande finesse après les opérations de dragage ces matériaux causent un problème du stockage, ces sédiments et vus leurs grandes teneurs en argile ils peuvent être utilisés en tant qu'addition partiellement substituable au ciment (APSC)

(Juenger, M. CG, 2019). Ce qui valide l'application des notions techniques que décrivent les argiles calcinées sur la vase calcinée dans ce domaine d'utilisation.

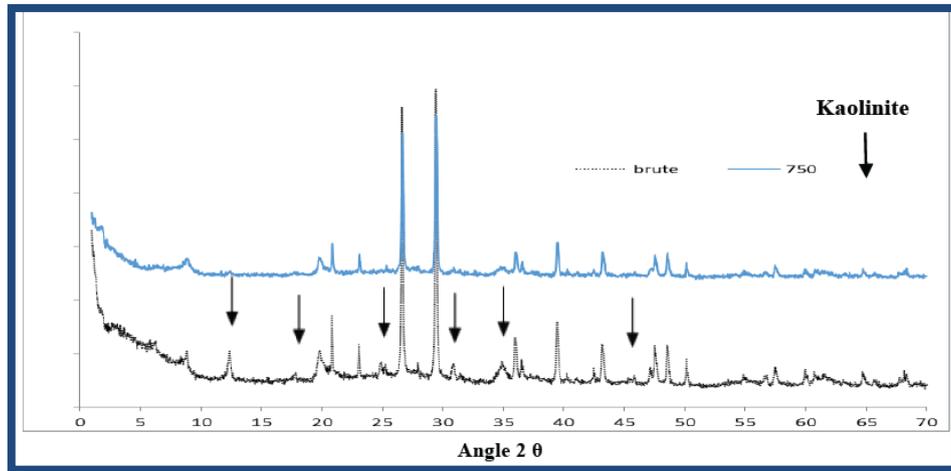


Figure 2. 11- Résultats DRX de la vase à l'état brute et état calciné (Belguessmia, K. 2018).

Au niveau local, plusieurs chercheurs cités dans la bibliographie ont traité ce sujet avec détail dont ils ont essayé de connaître le maximum possible sur ces sédiments ainsi que leurs comportements à savoir : identification du matériau, caractérisation à l'état frais et durci, essais de durabilité (Semcha, A. 2006, Belas, N. 2008, Belaribi, O. 2015, Bouhamou, N. E. 2016, Safer, O. 2017, Belguessmia, K. 2018, Taieb, F. 2018, Hadj Sadouk, R. 2018).

La vase des barrages a été extraite, traité, préparé au laboratoire de la façon suivante :

- 1- Extraction par des quantités suffisantes pour l'ensemble des essais et la transférer au laboratoire.
- 2- Passer en étuve pour éliminer l'humidité.
- 3- Broyage pour atteindre une finesse élevée.
- 4- Tamisage avec des mailles ne dépassant pas les 80 μ .
- 5- Calcination avec des fours avec des températures entre 750 à 950 °c pendant plusieurs heures.
- 6- Utilisés directement en tant qu'addition substituable partiellement au ciment avec des pourcentages variables allant jusqu'à 30 %.

La vase calcinée a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dans les universités dont les caractéristiques techniques ressorties sont comme ce qui suit :

II.4.2. Composition chimique de la vase calcinée

Belas, N en 2008 a utilisé les sédiments de dragage de barrage FERGOUG pour le remplacement partiel du ciment après calcination à 750°C pendant 5 heures et la composition chimique de ces sédiments sont montrés dans le Tableau 2.1.

Tableau 2. 1- Composition chimique de barrage FERGOUG (Belas, N. 2008).

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PF
Les teneurs (%)	83.16	3.67	0.46	9.92	0.14	Nul	2.91

Safer, O en 2017 dans son travail de recherche a utilisé la vase de barrage Chorfa en tant que substituant partiel au ciment dans des formulations de béton après calcination à 750°C pendant 5 heures dont l'analyse chimique sur cette vase est indiquée dans le Tableau 2.2.

Tableau 2. 2- caractéristiques chimiques de la vase de Chorfa (Safer,O. 2017).

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF
Les teneurs (%)	47.36	15.75	7.43	23.08	2.67	0.17	2.97	0.37	1.76

II.4.3. Le taux de remplacement du ciment par la vase calcinée

Des échantillons des bétons et mortiers contenant des différents pourcentages de la vase calcinée en tant qu'addition substituable partiellement au ciment ont été étudiés afin de diminuer l'impact sur l'environnement et d'améliorer les caractéristiques techniques de ces matériaux de construction.

Tableau 2. 3- Composition des mélanges ciment- vase (Semcha,A. 2006).

N° du mélange	% en Ciment	% en Vase Calcinée
1	70	30
2	50	50
3	30	70
4	100	00

Dans un travail expérimental, Semcha, A en 2006 a mis à l'épreuve les mélanges montrés dans le Tableau 2.3 pour déterminer le taux de remplacement du ciment idéal par la vase calcinée de barrage Fergoug après calcination pendant 5 heures à une température de 750°C, et ce pour atteindre la réactivité pouzzolanique la plus élevée.

Les résultats des rapports E/C et les résistances à la compression des mélanges étudiés par Semcha, A sont illustrés dans les Figures 2.12 et 2.13.

Semcha, A en 2006 a ressorti des résultats obtenus que les mélanges 2 et 3 ont enregistré une faible résistance à la compression, ces mélanges ont été proposés pour des domaines d'utilisations comme la stabilité des sols ou les travaux routiers, pour le mélange 1 de 30% de vase calcinée et 70 % de ciment portland a donné des résultats comparables à la

pâte témoin. Les taux de remplacement au-dessous de 30% en vase calcinée ont été proposés pour le développement dans la production des ciments.

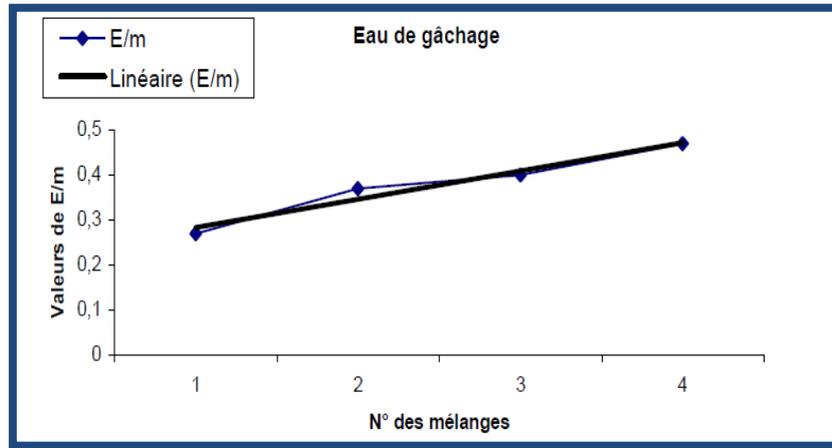


Figure 2.12- Valeurs de (Eau /Mélange) optimales pour les quatre mélanges (Semcha,A. 2006).

Il a été conclu de ce travail de Semcha, A que l'utilisation de la vase calcinée des barrages pour la substitution partielle du ciment est faisable et que le taux de substitution est bénéfique lorsqu'il est inférieur ou égal à 30 %, expliqué théoriquement par l'activité pouzzolanique de cette vase calcinée et sa capacité de réagir avec les produits d'hydratation du ciment CH et CaO.

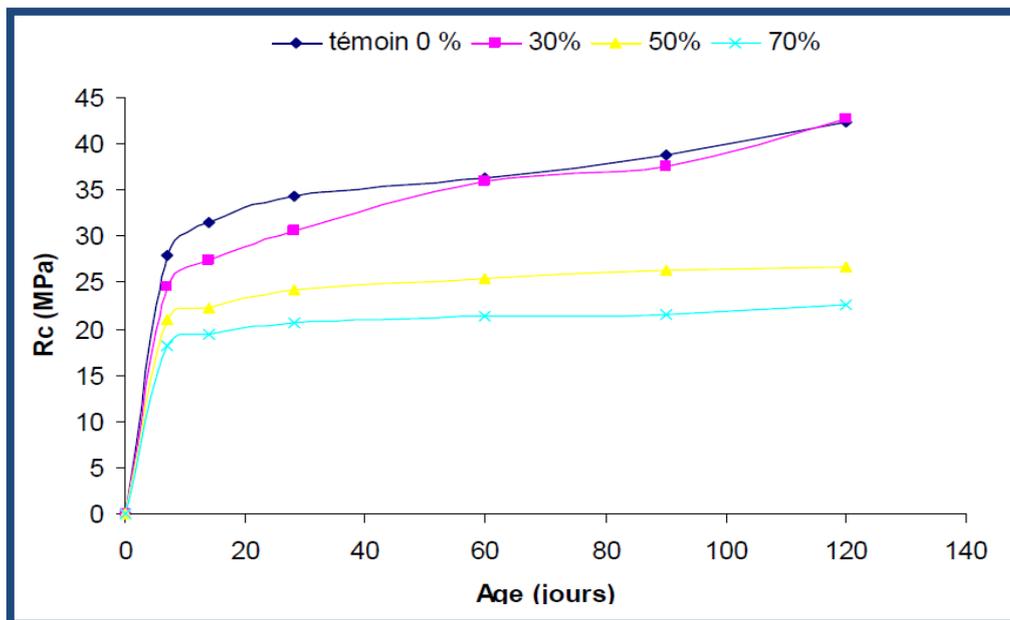


Figure 2.13- Résistances à la compression des quatre mélanges (Semcha, A. 2006).

II.4.4. Comportement de la vase calcinée à l'état frais

Des essais de caractérisation à l'état frais des ciments modifiés contenant la vase calcinée ont eu lieu par plusieurs chercheurs.

II.4.4.1. La consistance normalisée

Safer, O en 2012 a mesuré la consistance normalisée de trois pâtes dont une témoin à base de ciment portland (P0), la deuxième pâte contenant un taux de remplacement du ciment par 20% de la vase calcinée (PV20) et la troisième avec un remplacement par 20% de la pouzzolane naturelle (PP20), les résultats obtenus sont montrés dans la Figure 2.14.

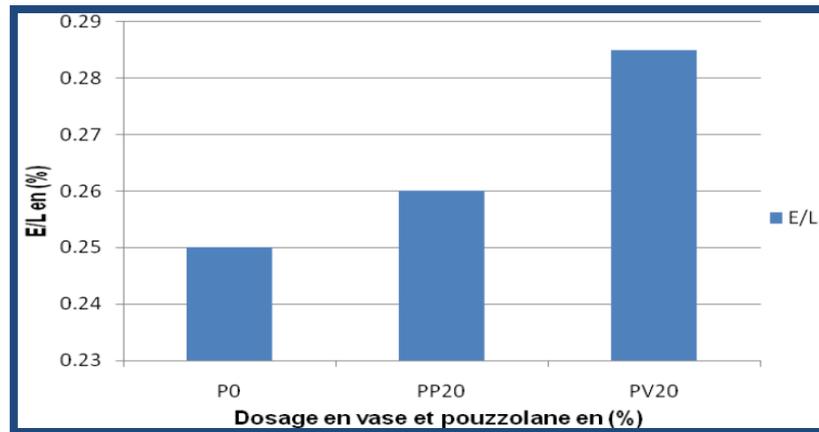


Figure 2. 14- Influence des dosages de 20% de vase calcinée et 20% pouzzolane naturelle sur le rapport E/L (Safer,O. 2012).

Il a été enregistré que le rapport E/L (Eau /Liant) le plus important est celui du PV20 (ciment avec un taux de remplacement par 20% de la vase calcinée) par rapport aux autres mélanges P0 et PP20.

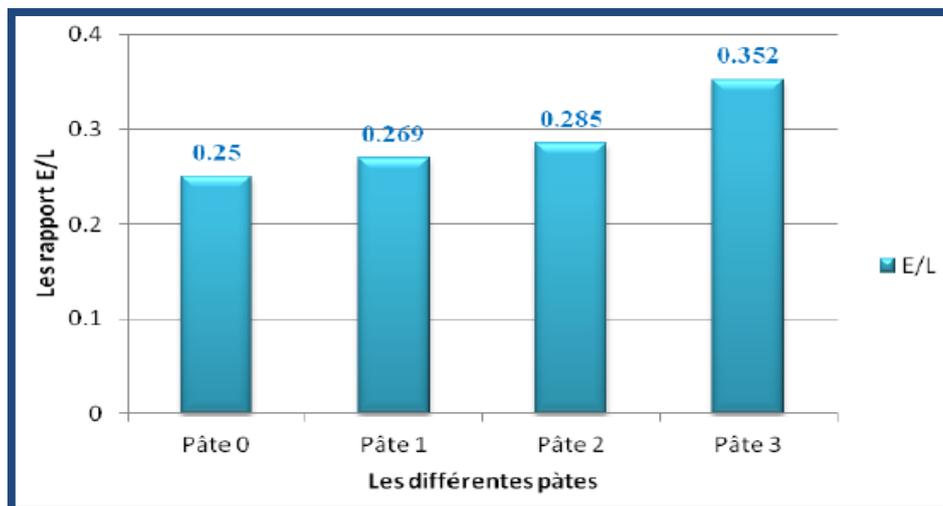


Figure 2. 15- Influence des dosages de vase sur les rapports E/L (Safer,O. 2017).

Aussi, le même auteur Safer. O en 2017 a mesuré la consistance normalisée de plusieurs pâtes contenant trois pourcentages différents de la vase calcinée de barrage Chorfa 10% (Pâte 1), 20% (Pâte 2) et 30% (Pâte 3) en les comparant avec un mélange témoin (Pâte 0) qui ne contient pas d'additions et les résultats obtenus sont illustrés dans la Figure 2.15.

L'auteur a remarqué qu'en augmentant le pourcentage de la vase calcinée en tant que APSC le rapport E/L augmente en proportion avec le taux de la vase, et ce vu l'augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la consistance normalisée.

Safer, O a expliqué l'augmentation de la demande en eau par la vase calcinée est due à la grande finesse des particules.

II.4.4.2. Le temps de prise

Safer, O en 2017 dans son travail de recherche a mesuré le temps de prise des pâtes contenant 10 % (Paste 10), 20% (Paste 20) et 30% (Paste 30) de la vase calcinée en tant qu'addition partiellement substituable au ciment et les résultats obtenus sont affichés sur la Figure 2.16.

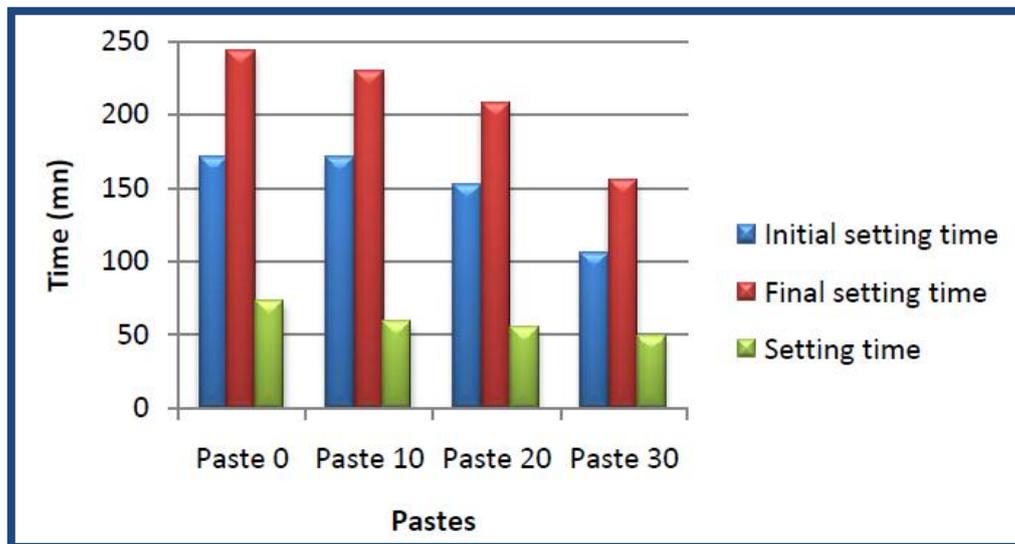


Figure 2. 16- Influence de la vase calcinée sur le temps de prise du ciment (Safer,O. 2017).

La Figure 2.16 illustre les résultats de temps de prise des ciments remplacés par des taux variables de la vase calcinée (10%, 20% et 30%), il a été reporté par l'auteur qu'en augmentant le pourcentage de la vase le temps de prise des pâtes diminue légèrement.

Ceci prouve que la vase accélère légèrement la prise du ciment proportionnellement avec le taux de remplacement, mais selon l'auteur le temps de prise généralement n'a pas été affecté par la substitution partielle de la vase calcinée.

II.4.4.3. Chaleur d'hydratation

Belaribi, O en 2015 a mesuré la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie adiabatique sur les différents ciments contenant les additions substituables lors d'une étude comparative entre les différents types de substitutions à savoir la vase calcinée de barrage Fergoug (VF), celle de barrage Chorfa (VC) et la pouzzolane naturelle (PZ) avec des taux de remplacement entre 10% à 30% par rapport au ciment témoin (MR) jusqu'à l'âge de 88 jours.

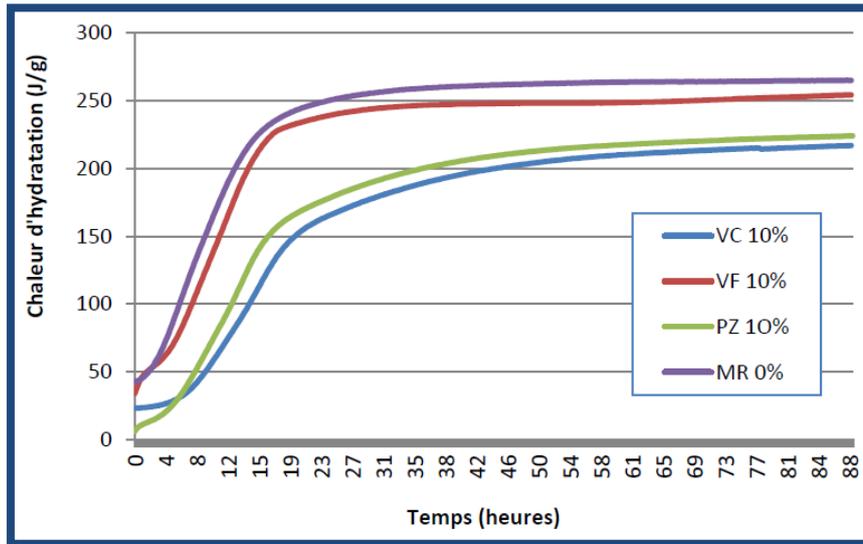


Figure 2.17- Évolution de la chaleur d'hydratation en fonction du temps des mortiers à base de 10% de vase calcinée et de pouzzolane naturelle.

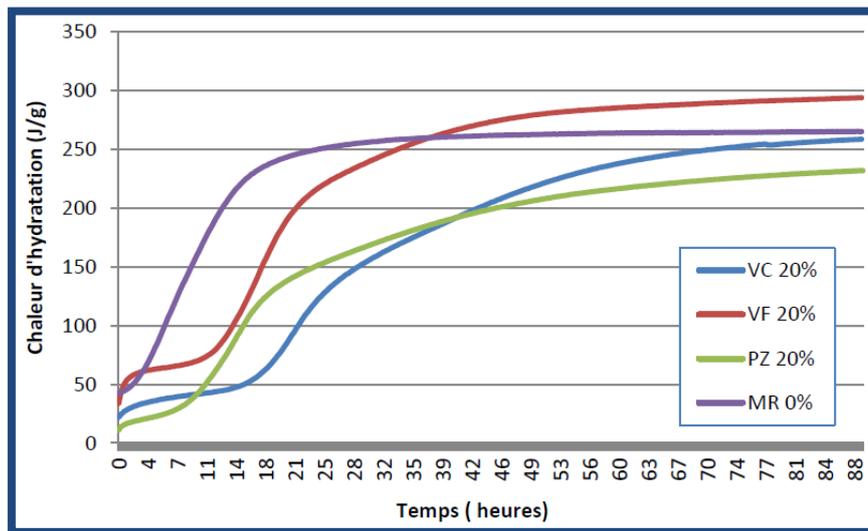


Figure 2.18- Évolution de la chaleur d'hydratation en fonction du temps des mortiers à base de 20% de vase calcinée et de pouzzolane naturelle.

Les résultats montrés dans les Figures 2.17, 2.18 et 2.19 prouvent que la vase calcinée diminue la chaleur d'hydratation en fonction du pourcentage d'addition substituable aux ciments (la vase calcinée et la pouzzolane naturelle) par rapport au ciment témoin. Après 22 heures la chaleur d'hydratation augmente avec le taux d'ajout.

La chaleur la plus importante enregistrée est celle du taux de remplacement VC 20% à 88 heures ce qui est dû selon Belaribi, O à la réaction pouzzolanique à caractère tardif par rapport à la réaction des C_3S .

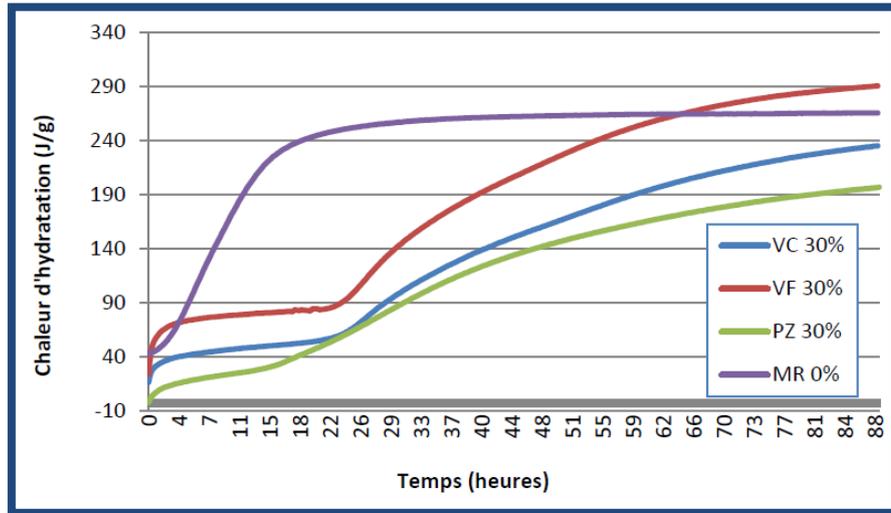


Figure 2.19- Évolution de la chaleur d'hydratation en fonction du temps des mortiers à base de 30% de vase calcinée et de pouzzolane naturelle.

II.4.5. Comportement de la vase calcinée à l'état durci

II.4.5.1. Resistance a la compression

La résistance à la compression est la caractéristique intrinsèque du ciment, la valeur conventionnelle à l'âge de 28 jours qui représente une valeur par laquelle on peut contrôler ou juger la qualité du ciment utilisé.

Il est connu que les matériaux pouzzolaniques influent positivement sur le comportement mécanique des ciments, car comme vu dans le chapitre précédant la résistance à la compression à jeune âge est principalement assurée par l'hydratation des C_3S et secondairement par celles des C_2S pour produire des C-S-H, C-A-H et des CH (ou d'éventuels Aft et Afm en cas d'existence suffisante des sulfates).

La portlandite (CH) résultat d'hydratation du ciment et le CaO (la chaux libre non combinée) réagit avec en présence de la silice réactive pour produire des C-S-H de second degré et cette réaction est dite la réaction pouzzolanique (CHAPTIRE II-6.5).

Belguesmia, K en 2018 dans un travail expérimental sur la valorisation des sédiments du barrage Chorfa dans les formulations des bétons autoplaçants en substituant partiellement le ciment par la vase de barrage Chorfa avec des taux de 10 %, 20% et 30%.

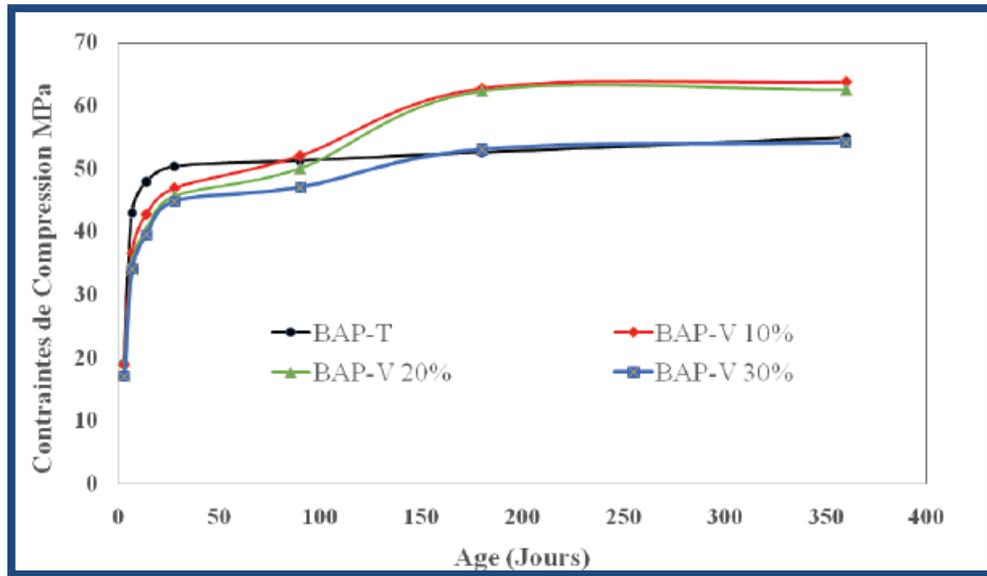


Figure 2. 20- Évolution des résistances à la compression en fonction du temps (Belguesmia, K. 2018).

Belguesmia, K a mesuré la résistance à la compression des mélanges jusqu'à l'âge de 350 jours (Figure 2.20), il a noté que les résistances des BAP contenant 10% et 20% de la vase calcinée deviennent supérieures à celles du BAP témoin après 90 jours et une résistance similaire à celui du BAP témoin pour le BAP contenant 30% de la vase calcinée.

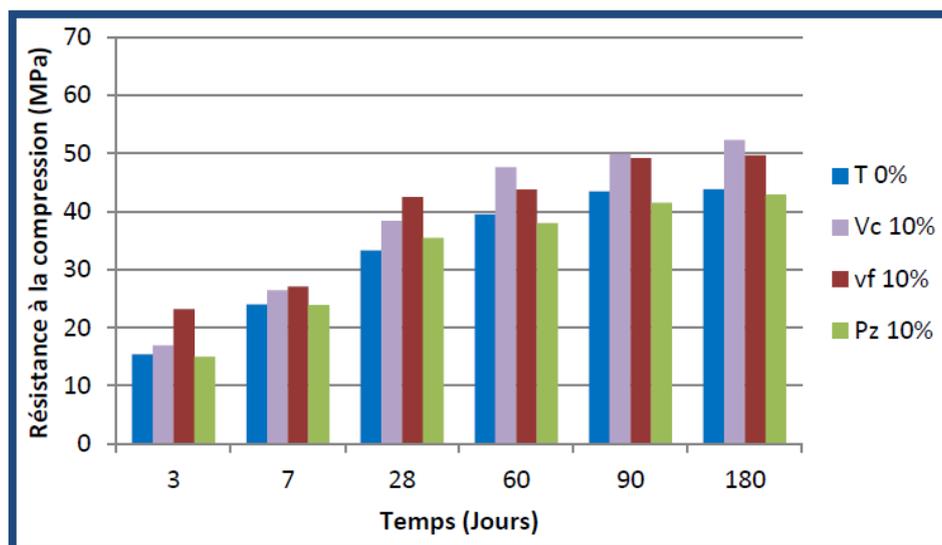


Figure 2. 21- Comparaison des évolutions des résistances en compression des mortiers à 10% de vase de Chorfa, de Fergoug et de pouzzolane naturelle (Belaribi,O. 2015).

Ce comportement mécanique clair a été expliqué par la réaction du métakaolin contenu dans la vase calcinée de barrage Chorfa avec des hydratés du ciment dans une réaction pouzzolanique. Pour le taux de remplacement 30% le comportement a été expliqué par l'effet de dilution du ciment qui a réduit les réactions d'hydratation du ciment.

Belaribi, O en 2015 a suivi le comportement mécanique des mortiers à base de la vase calcinée avec des taux de remplacement 10%, 20% et 30% pour les deux barrages de Chorfa et celle de Fergoug et comparés par rapport au comportement mécanique du mortier témoin.

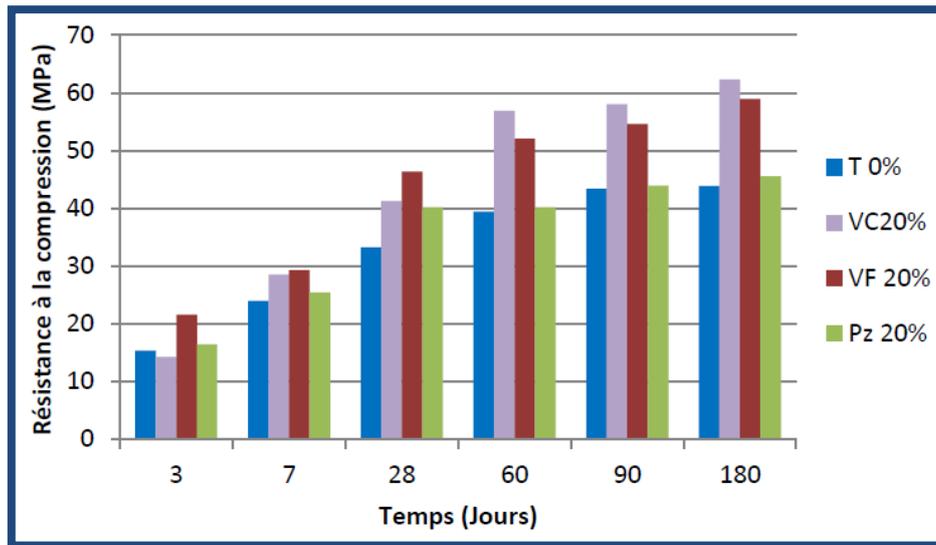


Figure 2.22- Comparaison des évolutions des résistances en compression des mortiers à 20% de vase de Chorfa, de Fergoug et de pouzzolane naturelle (Belaribi, O. 2015).

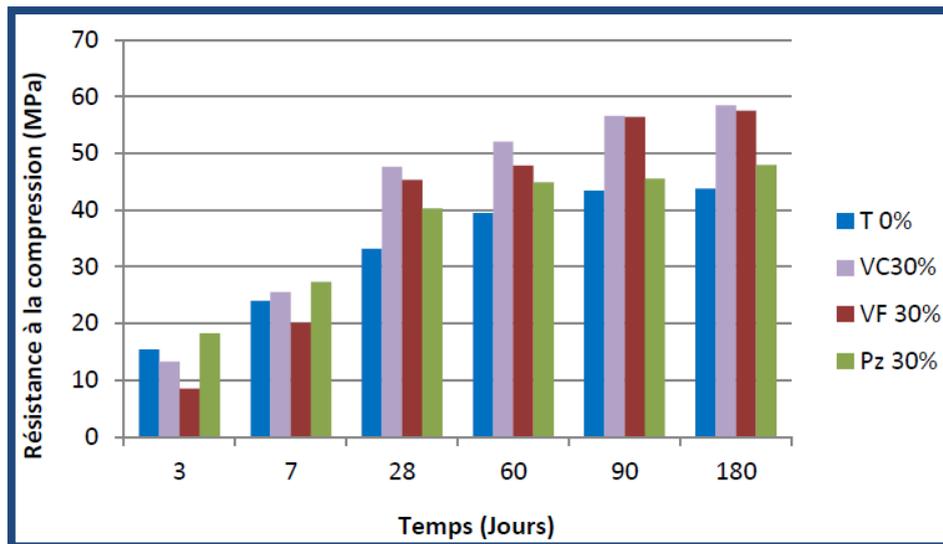


Figure 2.23- Comparaison des évolutions des résistances en compression des mortiers à 30% de vase de Chorfa, Fergoug et de pouzzolane naturelle (Belaribi, O. 2015).

Belaribi, O en 2015 a comparé entre le comportement mécanique de deux types de vases de barrages à savoir barrage Chorfa et celui de Fergoug, il a noté un comportement similaire que celui du travail de Belguesmia, K 2018 et il a rapporté un avantage remarquable des mortiers contenant de la vase de barrage Chorfa par rapport au celle de la vase calcinée de barrage Fergoug à court et à long terme.

II.4.5.2. La porosité

La porosité des BAP a fait l'objet d'une étude par Belguesmia, K en 2018 élaborées par prosimètre à mercure avec une pression appliquée de 200 Mpa dont les résultats sont montrés dans la Figure 2.24, les résultats obtenus prouvent que l'utilisation de la vase calcinée diminue la porosité des BAP étudiés.

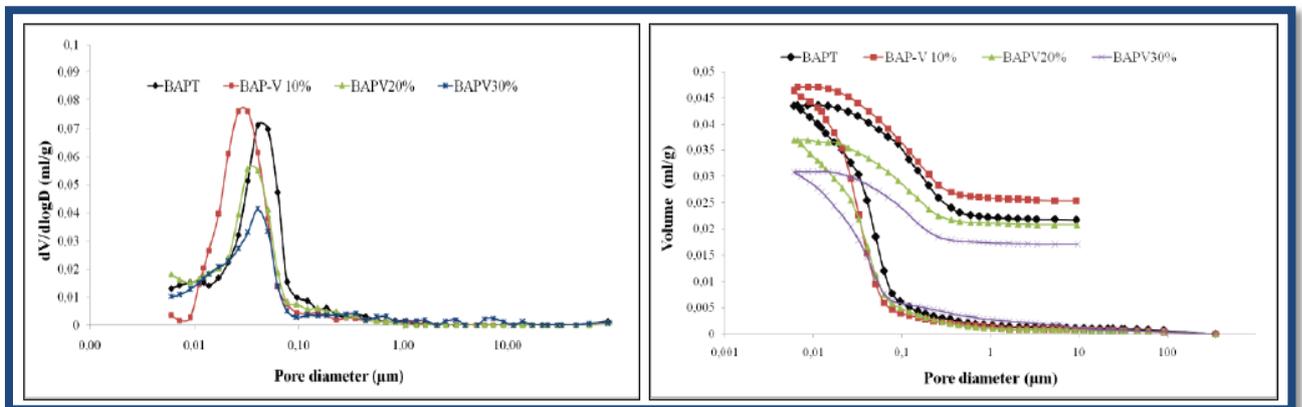


Figure 2. 24- Distributions porales des différents BAP et leurs volumes cumulés de pores (Belguesmia,K. 2018).

D'après résultats obtenus, Belguesmia, K a souligné que la vase calcinée de barrage Chorfa a densifié et rempli les vides de la structure des bétons autoplacants ce qui a diminué la taille des pores des BAP et ceci est bénéfique pour la durabilité des bétons.

II.4.5.3. Propriétés de transfert (Absorption capillaire)

Taieb, F en 2019 a procédé à l'essai d'absorption capillaire sur des mortiers bétons autoplacants équivalents MBAPE, six formulations ont été étudiés dont quatre MBAPE contenant 22% des additions partiellement substituable au ciment (la vase calcinée, les cendres volantes) comparé au MBAPE Témoin, l'ensemble des formulations ont été produites avec les deux rapports E/L= 0.39 et 0.47).

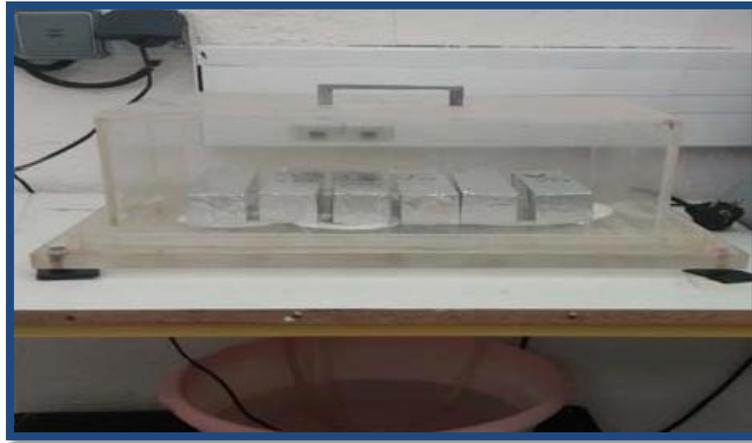


Figure 2. 25- Essai d'absorption capillaire sur mortiers (Taieb, F. 2019).

Les six mortiers MBAPE à l'âge de 28 jours ont été testés par l'essai d'absorption capillaire, les résultats présentés dans la Figure 2.26 montrent l'influence du rapport E/L, le type d'addition ainsi que le temps de l'essai.

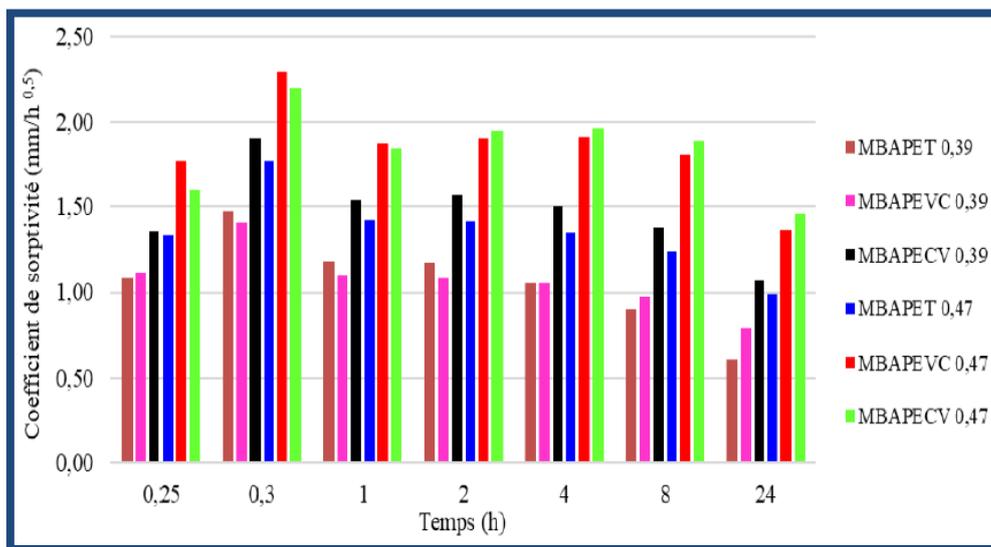


Figure 2. 26- Résultats d'essai d'absorption capillaire des six mortiers étudiés (Taieb, F. 2019).

Il a été noté par Taieb, F un avantage de la vase calcinée en tant qu'addition partiellement substituable au ciment par rapport aux cendres volantes pour réduire l'absorption capillaire.

La Figure 2.27 présente les résultats d'absorption capillaire des six MBAPE à 24 heures, en comparaison avec les cendres volantes la vase calcinée a influencé positivement la capacité des mortiers à réduire l'absorption de l'eau ce qui est bénéfique pour la durabilité.

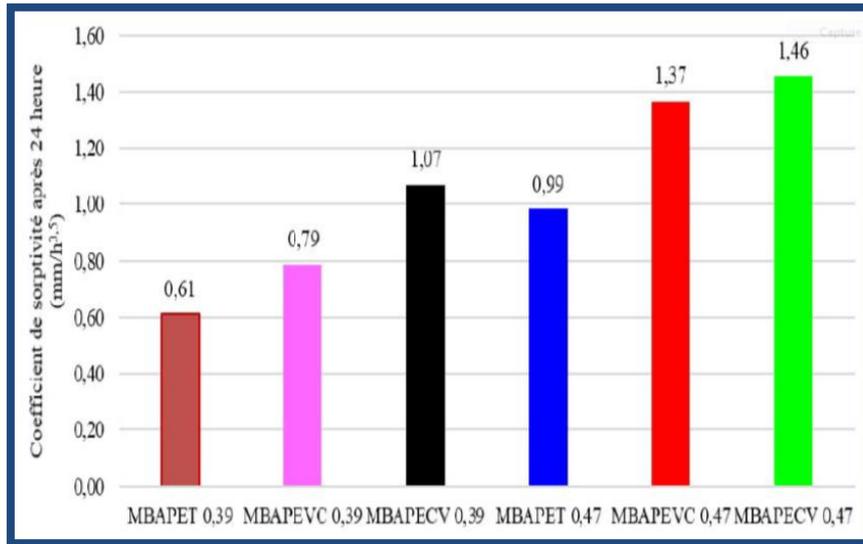


Figure 2. 27- Les résultats finaux de l'essai d'absorption capillaire après 24 heures (Taieb, F. 2019).

II.4.5.4. Variation des volumes (retrait)

La variation de volume est une importante caractéristique reliée à l'hydratation du ciment caractérisée par un fort dégagement de chaleur dans le cas des ciments portland et qui peut parfois provoquer d'énormes dégâts (Fissures, chutes de résistance à la compression) et influence directement la durabilité du béton.

Belas, N en 2008 dans un travail expérimental a procédé à la mesure de la variation de volume des bétons avec des ciments partiellement substitués par la vase calcinée de barrage de Fergoug avec des taux de 10%, 15% et 20% sur des éprouvettes prismatiques 7×7×28 cm³ (Figure 2.28).

II.4.5.4.a. Retrait endogène

La Figure 2.29 illustre les résultats de l'essai du retrait endogène qui est dû principalement aux réactions d'hydratation du ciment, on remarque une diminution dans les valeurs de variation de volume pour le béton à base de vase calcinée de barrage de Fergoug de l'ordre de 20% par rapport aux autres bétons, ces résultats ont été expliqués par la réduction dans la quantité de chaleur totale dégagée pendant les premières heures d'hydratation.



Figure 2.28- Des éprouvettes 7×7×28 mm pour les essais de variation des volumes (Belas,N. 2008).

La chaleur d'hydratation est le paramètre principal qui conditionne l'ampleur des déformations dues au retrait endogène. Par conséquent, le BV20 dont le retrait endogène est le moins important, selon l'auteur il serait bénéfique pour les bétons de masse afin de réduire le risque de fissuration (Belas, N. 2008).

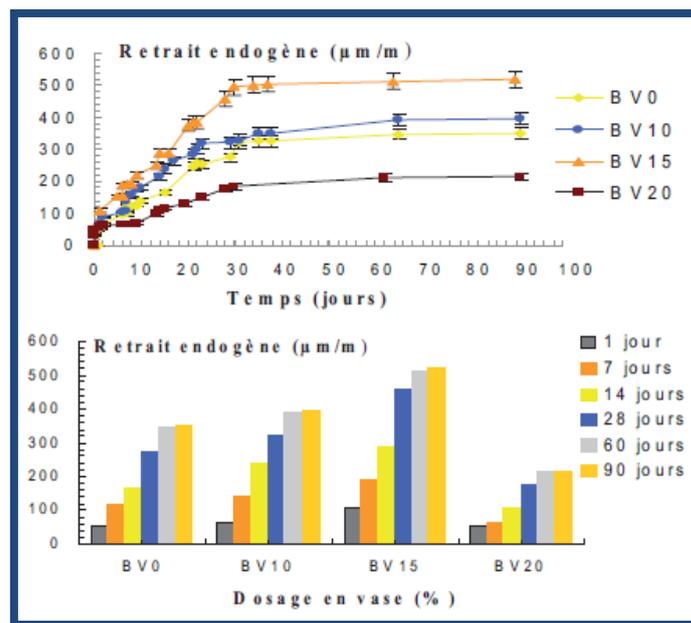


Figure 2.29- Evolution du retrait endogène pour l'ensemble des éprouvettes (Belas, N. 2008).

II.4.5.4.b. Retrait de dessiccation

La Figure 2.30 montre les résultats d'essai du retrait de dessiccation (évaporation) élaboré par Belas, N en 2008 dont les valeurs des retraits de dessiccation qui ont été proportionnelles aux taux de substitution par la vase calcinée.

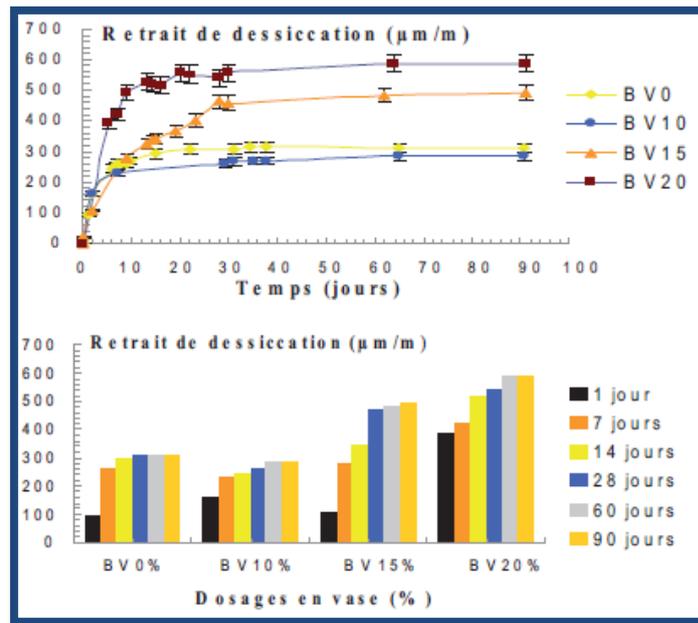


Figure 2.30- Evolution du retrait dessiccation pour l'ensemble des éprouvettes (Belas, N. 2008).

Ce retrait est influencé selon les auteurs par la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la consistance normalisée pour les bétons contenant la vase calcinée cette valeur est supérieur par rapport à celle du béton témoin.

II.4.5.4.c. Retrait total

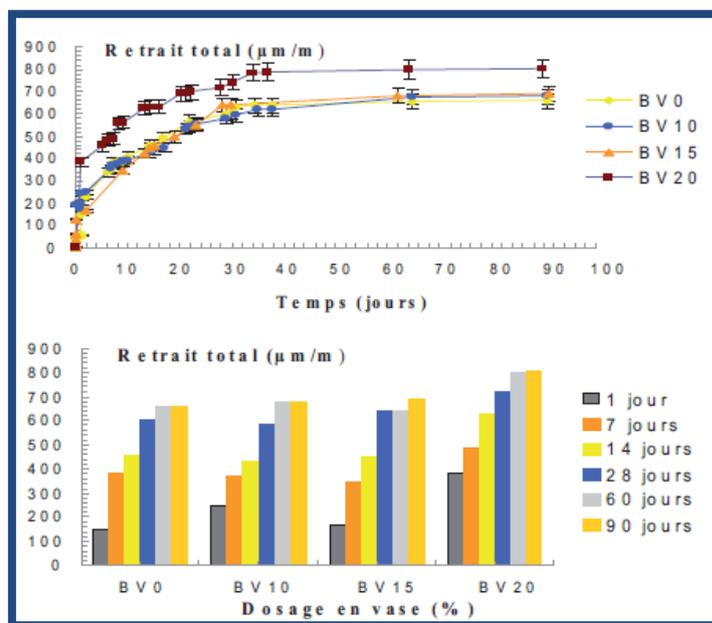


Figure 2.31- Evolution du retrait total pour l'ensemble des éprouvettes (Belas,N. 2008).

D'après les résultats obtenus par Belas, N en 2008, on remarque qu'appart le béton contenant 20 % de la vase calcinée les autres bétons ont présenté des retraits totaux similaires de l'ordre de 700 μm , le béton BV20 a présenté un retrait total de l'ordre de 800 μm à l'âge de 90 jours dû à la dessiccation élevée proportionnelle au rapport E/L.

II.4.5.4.d. Retrait empêché

En 2019, des essais de retrait empêché ont été réalisés par Taieb, F par la confection de trois mortiers MBAPE E/L= 0.47 avec l'utilisation de trois liants (ciment portland, ciment contenant 22% la vase calcinée, ciment contenant 22% les cendres volantes) sur des anneaux spécialisés pour l'essai, un décoffrage après 24 heures et un suivi des fissures durant une période de 49 jours ont eu lieu (Figures 2.32 et 2.33).



Figure 2. 32- Anneaux de mortier pour essai de retrait empêché (Taieb, F. 2019).

Les résultats obtenus et affichés sur la Figure 2.34 montrent que la vase calcinée a développé l'apparition des fissures dans un temps court de 2.71 jours contre 3.98 jours pour les cendres volantes avec des valeurs les plus élevées pour la vase calcinée probablement dues au retrait de dessiccation élevée pour la vase calcinée.

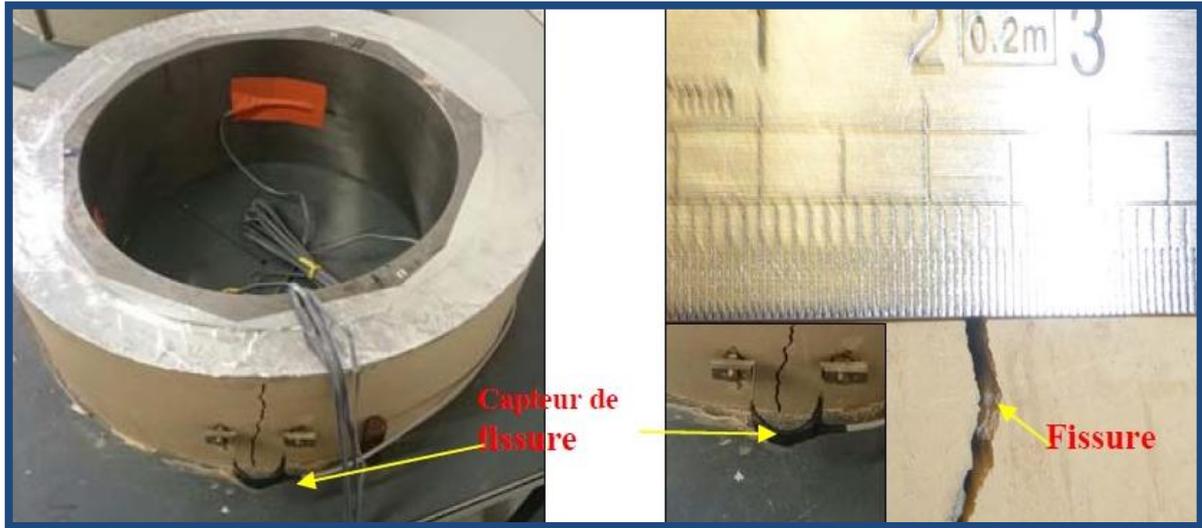


Figure 2. 33- Suivi de la variation de la largeur de fissure sur mortier par capteur (Essai de retrait empêché) (Taieb, F. 2019).

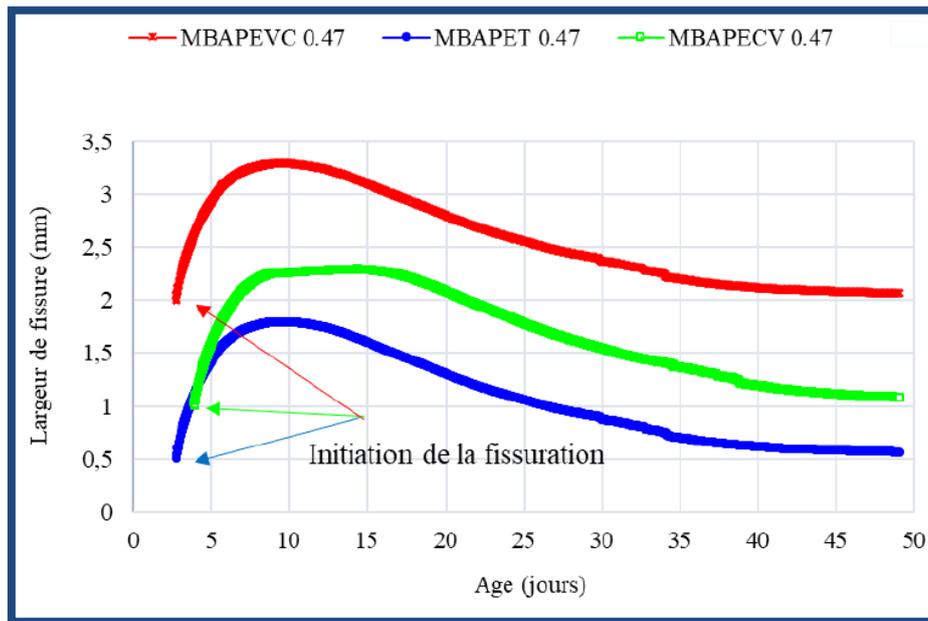


Figure 2. 34- Mesure des largeurs des fissures par le capteur de fissure (Taieb, F. 2019).

II.4.6. Durabilité des bétons à base de la vase calcinée

La durabilité des bétons contenant les ciments partiellement substitués par la vase calcinée ont été largement étudiée dans plusieurs travaux de recherche, des bétons ordinaires et autoplaçants ont été mis à l'épreuve pour étudier l'influence de la vase calcinée vis-à-vis des différentes agressions que peut rencontrer un béton dans son cycle de vie.

Dans cette partie du travail nous allons présenter une revue bibliographique sur les résultats des travaux expérimentaux de durabilité des bétons et des mortiers contenant la vase calcinée des barrages en tant que APSC.

II.4.6.1. Influence de la carbonatation sur le béton contenant de la vase calcinée

Safer, O en 2017 a mesuré la profondeur de carbonatation sur des éprouvettes de béton ordinaires (7×7×28 cm) contenant des différents pourcentages de vase calcinée 10%, 20% et 30 % dont ils ont été exposés à la carbonatation naturelle durant 12 mois ensuite les éprouvettes ont été mesurées par la profondeur de pénétration par phénolphtaléine, et les résultats sont affichés sur la Figure 2.36.



Figure 2. 35- Carbonatation naturelle à 12 mois (Safer,O. 2017).

La carbonatation c'est une attaque connue sur le béton due au CO_2 contenus dans l'air après dissolution du CO_2 il devient apte à réagir avec les composants basiques du ciment comme la portlandite (CH) pour former des carbonates de calcium ce qui réduit le Ph et rend le béton incapable à protéger les armatures contre la corrosion (Safer, O. 2017).

Il a été remarqué que la profondeur de carbonatation diminue en fonction de l'augmentation du taux de substitution par rapport à celle du béton témoin donc l'utilisation de la vase calcinée de barrage Chorfa a amélioré le comportement du ciment vis-à-vis à ce type d'attaque.

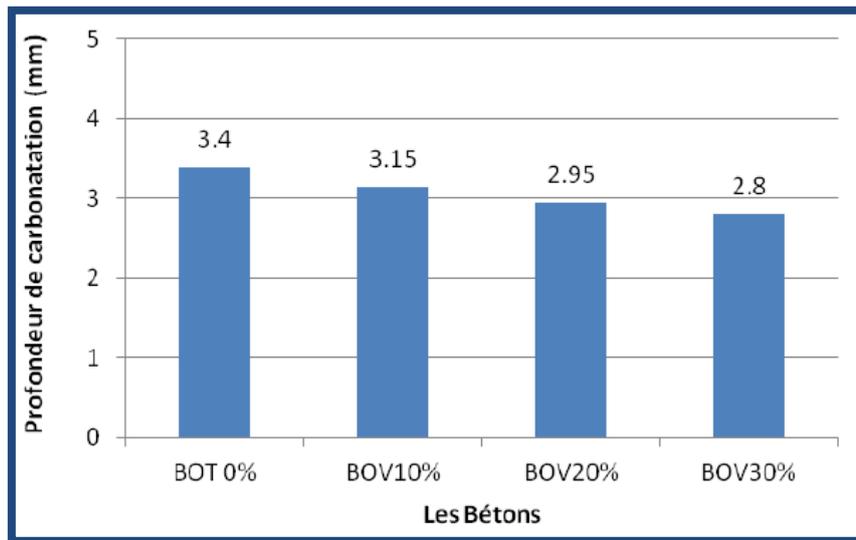


Figure 2. 36- Profondeur de carbonatation naturelle des bétons d'études, après 12 mois à l'air libre de laboratoire (Safer,O. 2017).

Belaribi O en 2015 a élaboré le même essai carbonatation avec une méthode accélérée sur ces bétons autoplaçants à l'aide d'une enceinte spécialisée au laboratoire avec le suivi de la profondeur de pénétration.



Figure 2. 37- Enceinte de carbonatation accélérée (Belaribi,O. 2015).

Les essais de Belaribi O ont été effectués sur des échantillons de BAP contenant la vase calcinée de barrage Chorfa, celle de barrage Fergoug et la pouzzolane naturelle.

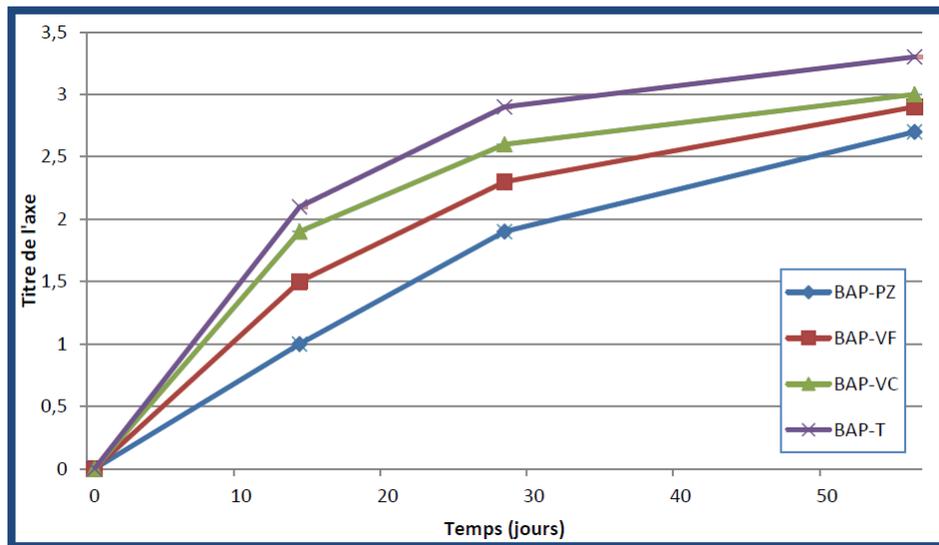


Figure 2.38- Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée des bétons.

Il a été reporté par les deux auteurs Safer, O. 2017 et Belaribi, O. 2015 que la pouzzolane naturelle et la vase calcinée des barrages augmentent la résistance du béton à la carbonatation, et ce comportement est due à la consommation de la portlandite et la densification de la structure des bétons (Figure 2.38).

II.4.6.2. Comportement vis-à-vis aux attaques sulfuriques externes

Le comportement des bétons autoplaçants (BAP) vis-à-vis des attaques externes des sulfates a été étudié par Belaribi, O. en 2015 sur les BAP par le suivi de l'évolution de la perte de masse et de la résistance à la compression des différents échantillons de béton autoplaçant avec des ciments contenant 20% de substituant (la vase calcinée) qui ont été immergés dans des solutions sulfuriques à savoir Na_2SO_4 et MgSO_4 avec une concentration de 5%, comparées par rapport aux échantillons immergés dans une eau douce.

II.4.6.2.a. Sulfate de Sodium

Les résultats présentés par les Figures 2.39, 2.40 et 2.41 illustrent les pertes de masse et les résistances à la compression des BAP contenant 20% de substituant au ciment à savoir la vase calcinée de barrage Chorfa, celle de Fergoug et la Pouzzolane naturelle.

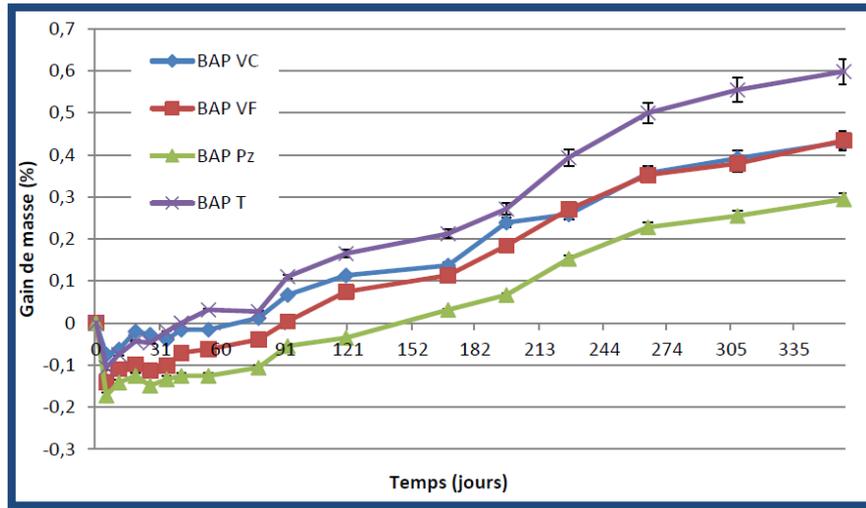


Figure 2.39- Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution du sulfate de sodium Na_2SO_4 (Belaribi,O. 2015).

Les résultats obtenus par les deux moyens de mesures à savoir la résistance à la compression la perte de masse des bétons ne sont pas conformes mais les deux moyens confirment que les additions minérales utilisées pour la substitution partielle du ciment se comportent mieux sous l'effet des sulfates de sodium.

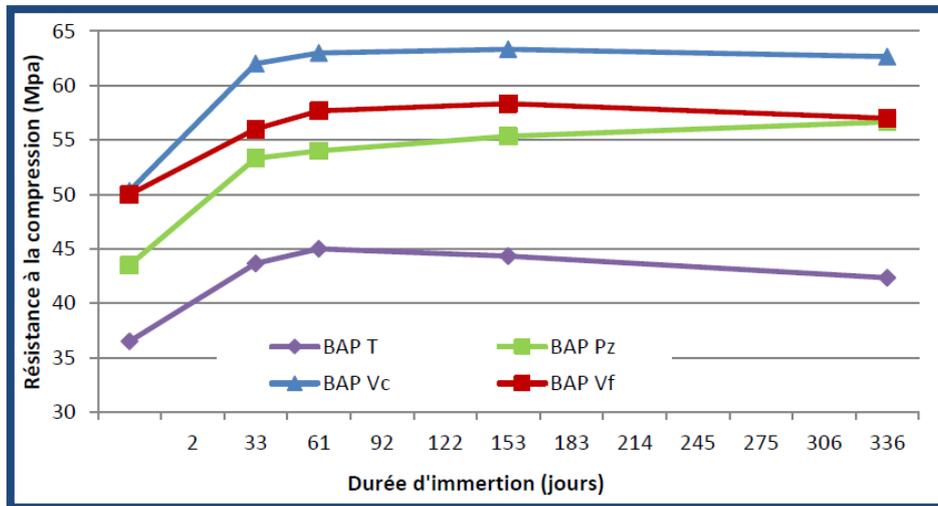


Figure 2.40- Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% Na_2SO_4 (Belaribi,O. 2015).

Ces résultats ont été liés à la diminution des hydrates de ciment responsables sur les réactions chimiques avec les sulfates pour produire l'ettringite.



Figure 2. 41- Echantillons des différents bétons, après 360 jours d'immersion dans la solution de 5% de Na_2SO_4 (Belaribi,O. 2015).

II.4.6.2.b. Sulfate de Magnésium

Les Figures 2.42, 2.43 et 2.44 présentent les résultats des travaux de Belaribi, O en 2015 après immersion de ces BAP dans des solutions de sulfate de Magnésium dans une durée d'une année.

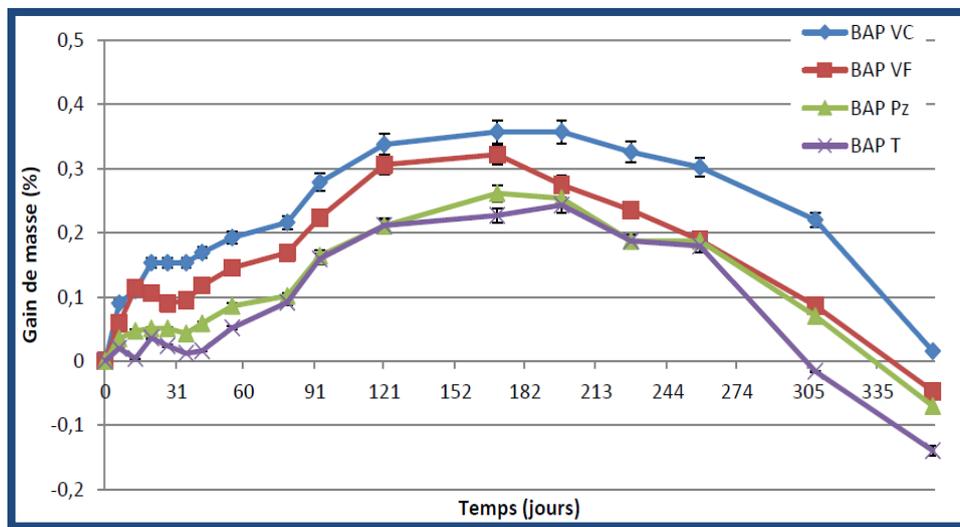


Figure 2. 42- Variation de la masse des échantillons immergés dans la solution de 5% MgSO_4 (Belaribi,O. 2015).

Les résultats confirment l'avantage de la vase calcinée de barrage Chorfa par rapport à la vase calcinée de Fergoug et la pouzzolane naturelle avec le plus faible comportement pour le BAP Témoin.

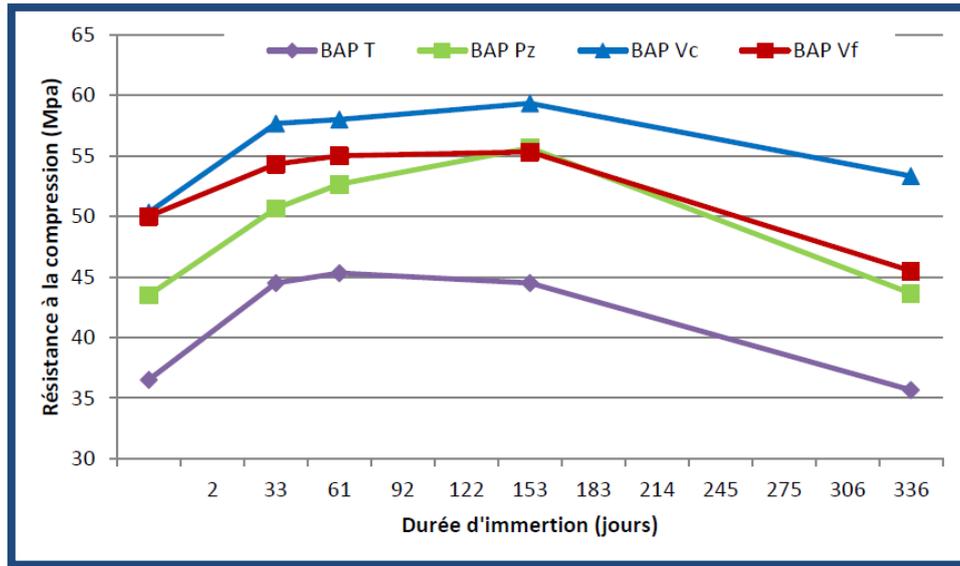


Figure 2. 43- Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% $MgSO_4$ (Belaribi,O. 2015).

Les résultats obtenus par Belaribi O en 2015 après immersion des BAP dans des solutions sulfuriques avec un suivi de gain de masse et des résistances mécaniques aux différents âges montrent l'avantage des ajouts pouzzolaniques par rapport au ciment Portland et approuve l'utilisation de la vase calcinée des barrages pour stopper les attaques sulfuriques.



Figure 2. 44- Echantillons de différents bétons, après 360 jours d'immersion dans la solution de 5% de $MgSO_4$ (Belaribi,O. 2015).

II.4.6.3. Les Attaques acides

La Figure 2.45 présente les résultats des pertes de masse des éprouvettes de béton immergés dans une solution d'acide sulfurique H_2SO_4 durant 12 semaines par Safer, O en 2018.

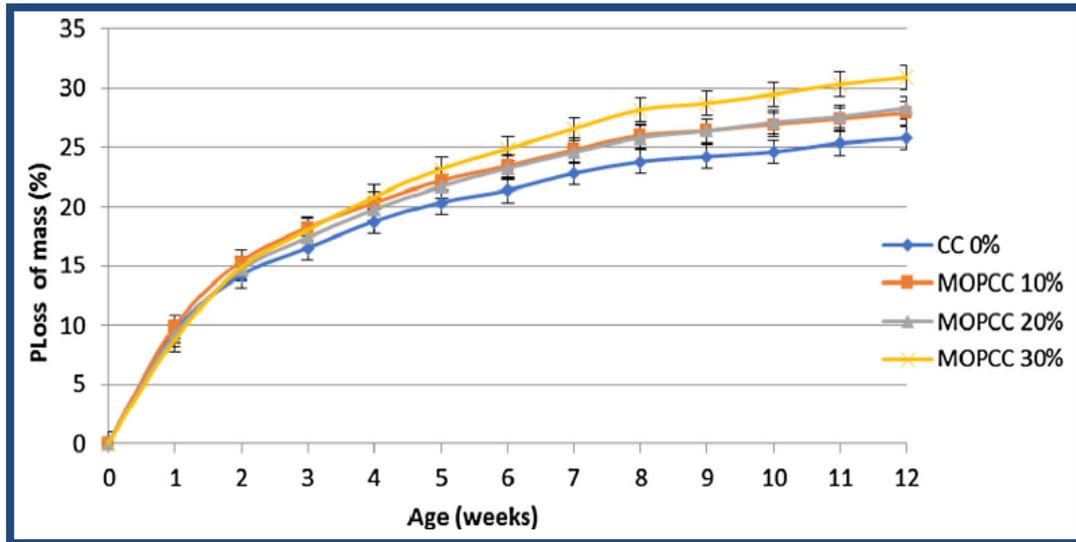


Figure 2.45- Perte de masse des BAP exposées à H₂SO₄ 5% durant 12 semaines (Safer,O. 2018).

Une faible résistance a été enregistrée des bétons contenant la vase calcinée par rapport au béton témoin vis-à-vis le milieu acide avec une faible différence des pertes de masse obtenues (Figure 2.46).



Figure 2.46- Echantillons de béton exposés en H₂SO₄ 5% durant 12 semaines.

Aussi Belaribi, O en 2015 a suivi la perte de masse des BAP contenant le taux de substitution partielle du ciment par la vase calcinée de 20% vis-à-vis des attaques acides H₂SO₄ et HCl avec une concentration de 5% durant 6 semaines.

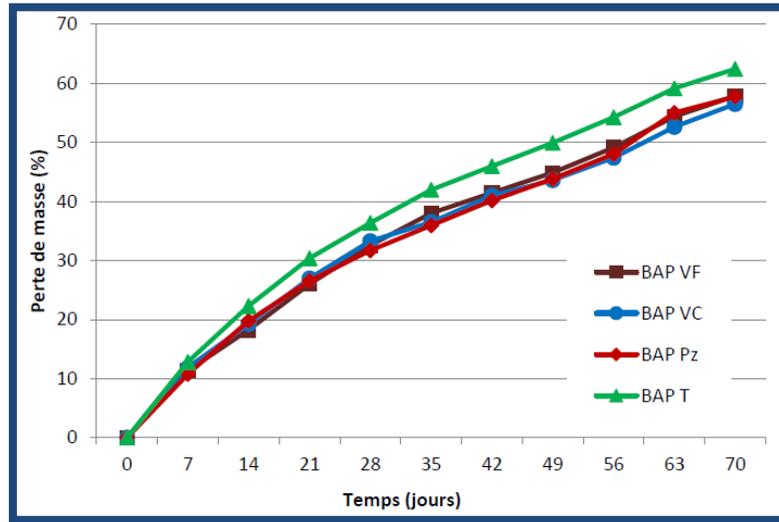


Figure 2.47- Perte de masse des BAP après immersion 6 semaines en H_2SO_4 5% (Belaribi, O. 2015).



Figure 2.48- Epreuves de BAP immergées 6 semaines en H_2SO_4 5% (Belaribi, O. 2015).

Lors d'attaques acides HCl 5% ou les BAP contenant 20% de la vase calcinée de barrage Chorfa, barrage Fergoug et la pouzzolane naturelle ont été comparés au BAP témoin par Belaribi O.

Les résultats obtenus illustrés dans la Figure 2.49 ont prouvé un avantage du BAP contenant la vase calcinée de barrage Chorfa par rapport aux autres BAP et le plus faible résultat enregistré est celui du BAP témoin.

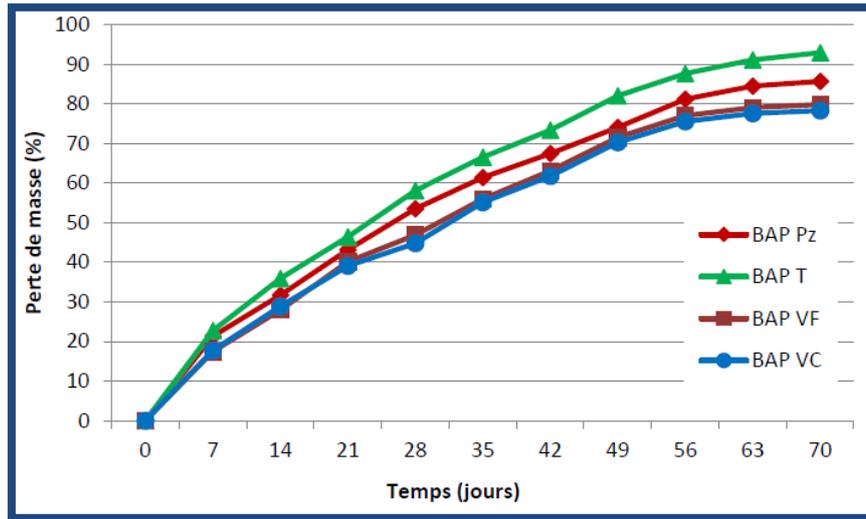


Figure 2. 49- Perte de masse des BAP immergés 6 semaines en HCl 5%.

D'après les résultats obtenus et montrés dans les Figures 2.45, 2.47 et 2.49 l'auteur a noté que ce comportement est du à la consommation de la portlandite dans le cas des BAP contenant les ajouts pouzzolaniques ce qui augmente la résistance des BAP avec la vase calcinée par rapport au BAP témoin.



Figure 2. 50- Eprouvettes de BAP immergées 6 semaines en HCl 5% (Belaribi, O. 2015).

II. 5. Conclusion

La présente étude bibliographique a permis de récapituler les compétences sur l'utilisation de la vase des barrages dans l'industrie du ciment vu qu'elle contient principalement des argiles dont le plus connu est le Métakaolin ce dernier change de structure

atomique après traitement thermique devient amorphe apte à réagir avec les hydrater du ciment dans la réaction pouzzolanique. L'utilisation de la vase calcinée en tant qu'addition partiellement substituable au ciment offre plusieurs avantages techniques permettant d'améliorer le comportement des ciments notamment l'augmentation du comportement mécanique à long terme, la réduction de la porosité, la résistance envers plusieurs types d'attaques tels que les sulfates et la carbonatation dont il est nécessaire pour la poursuite des recherches permettant le développement du sujet étudié.

Les auteurs cités dans l'étude bibliographique ont souligné l'obligation d'engager des stratégies de court et de long terme permettant le remplacement des déchets industriels en diminution tels que les cendres volantes, la fumée de silice le granulé des hauts fourneaux par des matériaux naturels disponibles en quantités nécessaires avec des impacts positifs sur l'environnement notamment les argiles calcinées. Les matériaux recherchés doivent répondre aux exigences modernes à savoir la réduction de consommation d'énergie, la diminution des dégagements néfastes dans l'environnement, répondre aux critères techniques recommandés et offrent des avantages économiques et financiers à l'industrie du ciment.

Chapitre III: Comportement des composés : durabilité et isolation thermique.

Chapitre III : Comportement des composés : durabilité et isolation thermique.

III. 1. Introduction

Pour s'adapter avec les exigences techniques modernes, le béton doit être conçu initialement avec la prise en considération des attaques qui peuvent exister dans l'environnement sur lequel il a été implanté.

Car si les mesures nécessaires ne sont pas prises en considération ces attaques sur le béton peuvent :

- ✓ Diminuer le comportement mécanique des éléments porteurs ce qui risque de mettre la vie humaine en danger.
- ✓ Réduire la durée de vie des bétons ainsi que leurs capacités à protéger les armatures contre la corrosion.
- ✓ Déformation et dégradation de l'esthétisme des éléments fabriqués en béton.

Ce chapitre représente une revue bibliographique sur les types d'attaques qui peuvent exister dans l'environnement des ouvrages en béton armé et qui feront l'objet de notre travail expérimental, des causes provoquant ces attaques ainsi que d'étudier la constitution des ciments permettant de résister à ces types d'attaques.

III. 2. La durabilité des bétons et des mortiers

Actuellement, les essais d'ouvrabilité et de résistance à la compression ne constituent plus les seuls moyens pour juger la qualité des bétons produits, les paramètres influant la durabilité sont devenus nécessaires pour développer les formulations des bétons (Hadjsadok, A. 2012).

Au cours des dernières années, la durabilité des bétons et la réhabilitation des structures en béton armé ont suscité un intérêt croissant (Baloch, W. L. 2021).

La durabilité du béton caractérise sa capacité de résister à la détérioration ainsi qu'aux attaques comme les environnements hostiles (Hossain, M. M. 2016), un béton qui ne contient pas de fissures avec un seuil minimal de vides il est dit « Solide » (Kumar, R. 2021).

Donc la durabilité du béton c'est sa capacité à résister aux attaques sans se dégrader et de garder ses caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques défini lors de la conception initiale le plus longtemps possible.

La durabilité du béton est directement affectée par l'environnement agressif dans lequel il peut se situer, à sa porosité et sa perméabilité (Hadjسادok, A. 2012). Un béton durable doit avoir un minimum de porosité, protège les armatures contre la corrosion, améliore la résistance envers les chlorures et résiste aux attaques néfastes qui peuvent exister dans son environnement (Hossain, M. M. 2016).

La durabilité du ciment à base des APSC est définie comme le degré de résistance envers les attaques aux cycles gel et dégel, corrosion, pénétration, carbonatation, résistance aux effets chimiques comme l'attaque des sulfates (Jaworska, W. 2022).

Il a été reporté dans la bibliographie qu'en général l'utilisation des matériaux pouzzolaniques améliore la durabilité des bétons et mortiers car ces matériaux sont moins polluants à l'environnement réduisant la porosité et la perméabilité des bétons et des mortiers ce qui augmente la résistance à la pénétration des agents agressifs (Hossain, M. M. 2016).

La durabilité des bétons est essentiellement liée à deux facteurs :

- ✓ Sa constitution.
- ✓ Sa mise en œuvre (MICHEL, A. 2022).

La transformation des produits d'hydratation du ciment en structures stables et insolubles au lieu de la portlandite (Hydroxyde de Calcium) réduit la sensibilité des produits cimentaires envers les attaques chimiques (Sulfates, Acides ... Etc) et participe à la réduction de la porosité et la perméabilité (Newman, J. 2003).

Les minéraux utilisés en tant qu'addition partiellement substituable au ciment (APSC) ont l'aptitude à augmenter la résistance du béton vis-à-vis des différents types d'attaques (Sevim, O. 2021).

L'augmentation de la résistance des ciments contenant les APSC est principalement dus aux facteurs suivants: l'effet de remplissage que caractérisent les particules fines des additions employées et le changement de la matrice cimentaire après les réactions entre ces

additions et les produits d'hydratation du ciment connus par réactions pouzzolaniques (Sevim, O. 2021).

L'utilisation des APSC participe à la consommation de l'hydroxyde de calcium (Portlandie) et la chaux libre (non liée lors de l'hydratation du ciment) produisant des calciums silicates Hydratés C-S-H et des C-A-H ce qui participe à l'augmentation de la résistance à la compression du ciment surtout à long terme (Sevim, O. 2021).

Le laitier granulé des hauts fourneaux, les cendres volantes et la fumée de silice sont les déchets industriels les plus connus et qui ont prouvé leurs places en tant que APSC (Newman, J. 2003).

Une politique de valorisation des déchets et des matériaux pouvant remplacer le ciment avec de différents taux a été lancée par des chercheurs partout dans le monde dont on cite les plus importants : le granulé des hauts fourreaux (1862), les cendres volantes (1934), fumée de silice (1947), le Métakaolin (1960) (Newman, J. 2003).

Le granulé des hauts fourneaux peut remplacer 50% de ciment, caractérisé par une grande finesse pouvant atteindre des valeurs de l'ordre de 8000 cm²/g ce qui augmente la résistance à la compression des bétons (Sevim, O. 2021).

Sevim O, en 2021 a souligné que l'activité pouzzolanique augmente avec la hausse du taux de substitution du ciment par la poudre de brique caractérisée par une grande finesse.

La finesse des APSC est un paramètre important dont plus la taille de ces grains est petite plus ils sont aptes à s'hydrater facilement ce qui facilite les réactions chimiques avec les hydrater du ciment, participe à l'augmentation de l'activité pouzzolanique ce qui augmente le comportement mécanique à long terme ainsi que la durabilité de béton (Sevim, O. 2021).

La résistance des ciments à base des APSC contre les attaques chimiques dépendent des propriétés de transfert tel que la capillarité la porosité et les dimensions des pores. Qui facilitent l'infiltration des sulfates à travers les pores (Jaworska,W. 2022).

III. 3. Attaque interne des sulfates (I.S.A)

Parmi les types d'attaques pouvant réduire la durée de vie du béton armé et détruire la couche protectrice des aciers est l'attaque des sulfates. Les sulfates existent dans la nature sous plusieurs formes telles que les sols, les eaux de mer, la décomposition de la matière organique ou dans les effluents industriels (Elahi, M. M. A. 2021).

Les sulfates sont les composants principaux de l'eau de mer conduisant lors d'une attaque sulfatique sur le béton à des modifications dans sa structure et causant des expansions,

des fissures et des écaillages, ce qui influe négativement la résistance à la compression des bétons (Li, X. 2022, Brekailo, F. 2022).

Dans la nature, la source des sulfates peut être interne ou externe du béton dont les attaques des sulfates internes sont généralement notées (I.S.A) et les attaques externes des sulfates notées (E.S.A) (Colman, C. 2021, Brekailo, F. 2022, Camanducaia, L. PM, 2022).

L'attaque interne des sulfates (I.S.A) sur le ciment est provoquée par une source interne des sulfates sur le ciment en général dans un état solide (Colman, C. 2021, Elahi, M. M. A. 2021).

Actuellement et vu l'augmentation d'utilisation des agrégats recyclés résultant des opérations de démolition des anciennes constructions contenant des taux variables de gypse a augmenté le risque de l'attaque interne des sulfates dans les bétons produits (Colman, C. 2021).

Aussi, l'attaque interne des sulfates (I.S.A) peut être initiée à cause d'utilisation des granulats contaminés par les sulfates comme la pyrite (Camanducaia, L. PM, 2022). L'attaque interne des sulfates (ISA) est généralement due aux agrégats comme la pyrite et les agrégats recyclés (Camanducaia, L. PM, 2022, Colman, C. 2021, Brekailo, F. 2022).

L'attaque interne des sulfates est vaguement remarquée sur les barrages dans les pays à différents climats comme le Brésil l'Espagne et le Canada (Camanducaia, L. PM, 2022).

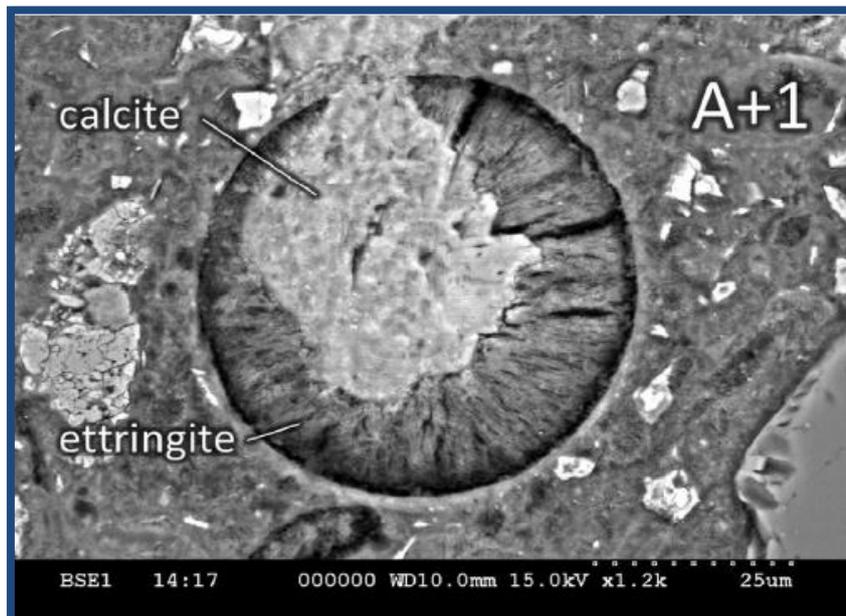


Figure 3. 1- Vue microscopique de la décomposition de l'ettringite en calcite du à l'attaque interne des sulfates (Colman, C. 2021).

L'attaque sulfurique est résultante de la réaction entre les aluminates tricalciques composantes principales du clinker et les sulfates (I.S.A ou E.S.A) en présence de l'eau pour former les ettringites secondaires (Colman, C. 2021), ce type d'attaque est néfaste pour le béton.

Le gypse est le produit de réaction des sulfates avec la portlandite provoquant une chute dans le Ph réduisant la couche assurant la protection des armatures dans le béton (Li, X, 2022). Le gypse et l'ettringite sont des phases destructives (CAMANDUCAIA, Laura PM, 2022), le gypse a été principalement observé à la surface du béton détérioré par les sulfates spécialement dans les fissures et les vides (Figure 3.1) (Elahi, M. M. A, 2021). Plusieurs études ont montré que parmi les causes de l'expansion du béton est la formation du gypse (Elahi, M. M. A, 2021). La formation du gypse est accompagnée par une chute de pH du système et une réduction importante dans la résistance à la compression du béton et des mortiers (Elahi, M. M. A, 2021).

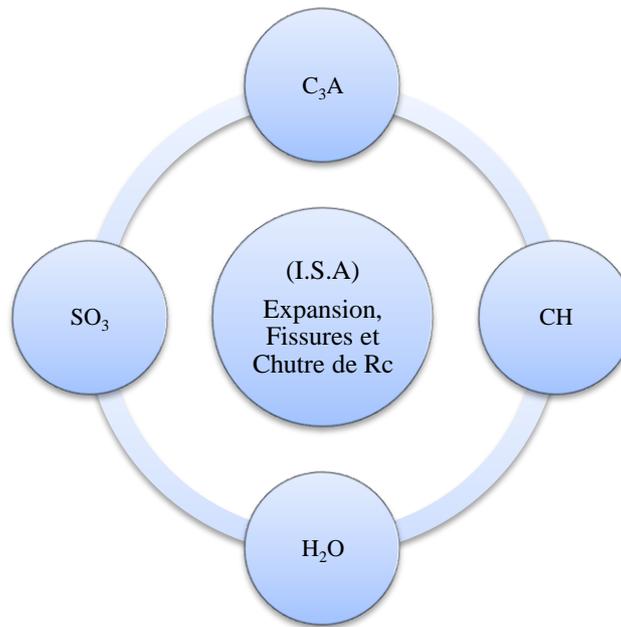


Figure 3. 2- Les conditions d'attaque interne des sulfates (Elahi, M. M. A. 2021).

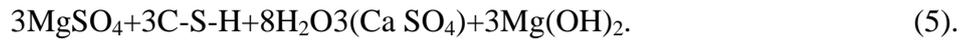
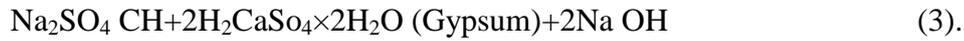
Les causes participant à l'accélération de l'I.S.A sont: l'humidité, l'oxygène, la température, la morphologie et les dimensions des agrégats (Camanducaia, L. PM, 2022).

En présence de la portlandite (CH), l'eau (H), le monosulfate hydraté ($C_3A.CS.H18$) et le calcium aluminate hydraté ($C_3A.CH.H18$) réagit avec les sulfates (Figure 3.2) pour produire l'ettringite ($3CaO. Al_2O_3. CaSO_4. 32H_2O$) et le gypse ($CaSO_4.2H_2O$) (Elahi, M. M. A. 2021) selon les formules suivantes:



Note: S' représente les sulfates externes.

Les C-S-H se transforment en gypse par une externe attaque des sulfates en présence du magnésium produisant la brucite Mg (OH)₂ (Elahi, M. M. A, 2021):



Trois méthodes principales pour combattre l'attaque sulfatique :

- Limité les C₃A.
- Réduction du CH (Brekailo, F. 2022).
- Réduire de la perméabilité (Elahi, M. M. A, 2021).

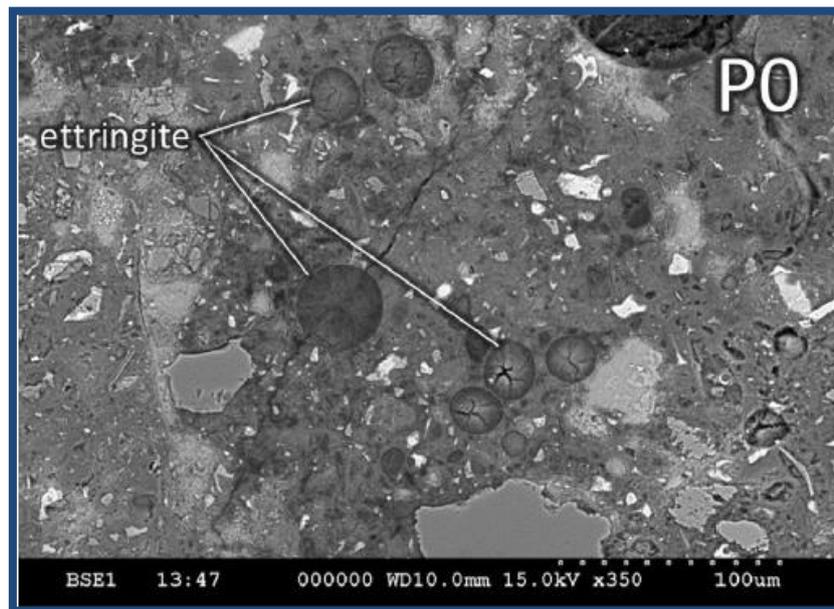


Figure 3. 3- Vue microscopique d'un mortier ayant subi une attaque interne des sulfates (Colman, C. 2021).

Les conséquences résultantes d'une attaque sulfurique sur le béton se manifestent par la formation d'expansion, apparition des fissures, écaillage augmentation de perméabilité des bétons et à la fin une chute de résistance à la compression (Figure 3.3) (Elahi, M. M. A, 2021).

L'Ettringite, formation de Gypse, la formation différée de l'ettringite (DEF) où thaumasites sont des attaques diverses qui peuvent être une source de danger sur le béton, causé par l'existence des sulfates (Yu, X-T, 2018. Li, X, 2022).

L'ettringite est un produit d'hydratation qui participe à l'augmentation de la résistance à la compression mais il devient dangereux lorsqu'il se produit en retard dans une pâte durcie (ettringite secondaire) (Colman, C. 2021).

La formation différée de l'ettringite (DEF) c'est la formation de l'ettringite après le durcissement de la pâte du ciment ce qui provoque des pressions internes lorsque ça dépasse la résistance à la traction du béton elle provoque les fissures et l'écaillage du béton (Li, X, 2022).

Thaumasite ça se passe dans de très faibles températures (moins de 15 degrés surtout entre 0-5°C) et dans la présence des ions de carbonates ce qui détruit le C-S-H (Li, Xi, 2022) dont le béton par la suite se transforme à une masse non cohésive (Elahi, M. M. A, 2021).

Les cycles séchage humidité accélèrent l'attaque des sulfates (Jaworska,W. 2022).

Les auteurs cités dans la littérature ont reporté en accord commun que parmi les méthodes pratiques et simples utilisées pour stopper l'effet des attaques des sulfates sur le béton et le mortier est d'utiliser les additions partiellement substituables au ciment. L'utilisation des APSC consomme l'hydroxyde de calcium et augmente la résistance des bétons vis-à-vis des sulfates SO_3 (Elahi, M. M. A, 2021). Les cendres volantes est une des solutions utilisés pour réduire l'attaque des sulfates. Le remplacement du clinker avec un taux entre 25 à 30% par les cendres volantes augmente la résistance contre les sulfates (Jaworska,Wę. 2022).

L'adjuvant entraîneur d'air diminue la taille des pores, le facteur transport des ions vers l'intérieur de la structure des bétons ce qui a un effet positif sur la résistance des mortiers vis-à-vis des attaques sulfuriques (Jaworska,W. 2022).

La meilleure résistance contre les sulfates peut être atteinte par augmenter le taux des C-S-H et réduire l'hydroxyde de calcium et calcium mono-sulfate et calcium aluminat le plus possible (Jaworska,W. 2022).

Le suivi de la résistance à la compression du béton est le meilleur est plus fiable méthode pour suivre les bétons et mortiers exposés à une attaque des sulfates (Elahi, M. M. A, 2021). Les meilleurs outils pour tester la résistance des mortiers aux ISA sont la variation de longueur et la résistance à la compression (Camanducaia, L. PM, 2022).

III. 4. Résistance des mortiers vis-à-vis l'attaque a l'acide chlorhydrique « HCl »

L'acide chlorhydrique « HCl » n'est pas un composé chimique naturel mais il peut causer la destruction des bétons et des mortiers dans les sites industriels (De, C. 1992, Muthu, M, 2022).

Chandra S, en 1988, a étudié le comportement des mortiers immergés dans l'acide Chlorhydrique avec une concentration de 15% durant 5 jours, des analyses chimiques sur les mortiers au niveau des cinq profondeurs montrées par la Figure 3.4 ont été conduit pour voir l'effet de ce type d'attaque sur les différentes parties du mortier.

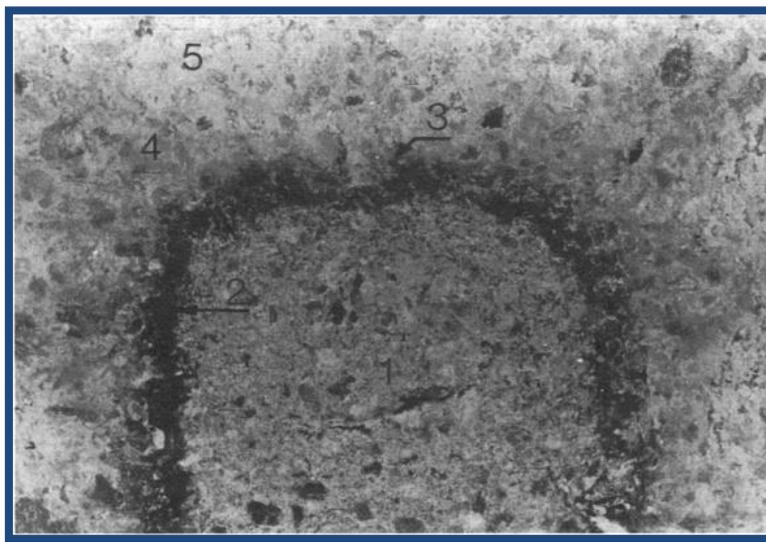


Figure 3. 4- Coupe d'une section prismatique du mortier exposé à l'acide Chlorhydrique 15% durant 5 jours (Chandra, S. 1988).

D'après les résultats obtenus montrés au Tableau 3.1, il a été noté par le même auteur que la nature siliceuse dans la composition du mortier est la plus résistante contre les attaques acides et que l'élément le plus sensible est le calcaire.

En conclusion, Chandra, S a reporté que le calcium est le composant le plus sensible à l'attaque par l'acide chlorhydrique ce qui augmente la porosité du mortier et le rend perméable et facilite sa destruction.

De, C en 1992, a reporté que les effets de l'acide chlorhydrique sur le mortier sont multiples à savoir le changement dans la minéralogie ce qui le rend fragile avec une chute de résistance à la compression néanmoins l'utilisation de l'oxyde de fer dissous qui forme l'hydroxyde ferrique peut influencer positivement le comportement des mortiers.

Kumar, R en 2021, a noté que l'utilisation du Métakaolin en tant qu'addition partiellement substituable au ciment réduit l'effet de l'acide chlorhydrique (1% de concentration) sur le mortier à ciment étudié durant 224 jours, ce qui est dû à la haute teneur

en alumine dans le Métakaolin qui produit des C-A-H plus stable sous l'effet de l'acide par rapport au C-S-H.

Tableau 3. 1- Composition chimique des mortiers après attaque à l'acide chlorhydrique 15% durant 5 jours sur les 5 zones de la Figure 3.4 (Chandra, S. 1988).

Composition du mortier	Mortier Témoin (%)	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5	
		AA	EDAX								
SiO₂	77.6	64.44	59.64	60.60	54.93	83.01	71.20	82.90	70.50	81.20	70.70
CaO	14.5	13.84	12.60	10.30	11.40	9.20	9.80	4.30	3.65	4.26	3.52
Fe₂O₃	3.4	3.02	2.95	3.80	3.70	1.87	1.77	1.85	1.73	1.84	1.72
Al₂O₃	4.4	4.46	4.25	4.93	5.30	4.02	4.20	3.92	4.18	3.85	4.19
Cl	0		0		9.29		11.70		10.15		10.15

Le même auteur a enregistré que les mêmes résultats ont été remarqués par l'utilisation de la fumée de silice et les fillers calcaires pour le remplacement du ciment, Il a lié ce comportement à la réduction de la perméabilité du mortier par l'effet filler des ajouts pouzzolaniques.

Kumar, R en 2021, a souligné aussi que l'utilisation d'un mélange ternaire de 10% des fillers calcaires, 20% PN et 70% CP taux massique améliore le comportement des ciments sous l'effet des acides avec un comportement positif par rapport au ciment témoin et 15% des fillers calcaires seuls.

Les cendres volantes, la fumée de silice et le laitier granulé des hauts fourneaux produisent plus de C-S-H et consomment les CH, ce qui rend les ajouts pouzzolaniques plus efficaces dans l'environnement acide (Hossain, M. M. 2016).

Les auteurs ont reporté que les bétons produits par le remplacement de ciment par 10% de Métakaolin résistent mieux à l'attaque des acides par rapport au béton témoin.

Des mélanges ternaires contenant 8% de fumée de silice et 20% des cendres volantes ont été utilisés pour le remplacement du ciment dans des formulations des bétons ce qui a amélioré considérablement la durabilité des bétons produits (Hossain, M. M. 2016).

Dans plusieurs recherches, il a été montré que la pouzzolane naturelle améliore la résistance du ciment vis-à-vis les attaques acides, ce qui a été expliqué par la consommation de l'hydroxyde de calcium résultant de l'hydratation du ciment et rend le mortier et le béton moins poreux vu la grande finesse de ce type d'addition (Laoufi, I. 2019. Senhadji, Y.2014).

Tous les ciments contenant la chaux libre et l'hydroxyde de calcium ont une sensibilité envers les attaques acides surtout lorsque le pH diminue au-dessous de 3.5 (Newman, J. 2003).

Mohit, M en 2021 a expliqué l'amélioration de la résistance des ciments contenant les ajouts pouzzolaniques par rapport au ciment Portland vis à vis l'acide chlorhydrique par la consommation des CH (Portlandite).

En présence des CH, ce dernier réagi chimiquement avec l'HCl produisant les calciums de chlorures $Ca Cl_2$, ce produit est néfaste pour le mortier et participe à son rôle à la décomposition des C-S-H et les C-A-H (Mohit, M. 2021).

Dans l'ensemble des recherches citées dans la bibliographie, le suivi de résistance des mortiers aux attaques acides a été généralement conduit par l'essai de mesure de la variation de masse, mais ça n'empêche pas à utiliser d'autres méthodes d'investigation supplémentaires pour éclaircir les déformations et la perte de masse (Hossain, M. M. 2016).

III. 5. Résistance des mortiers aux hautes températures

Les hautes températures sont une attaque dangereuse sur le béton, elle peut arriver naturellement, accidentellement, par négligence ou par sabotage (Saridemir, M. 2022).



Figure 3. 5- Photo réel des incendies.(Majid, S, 2022).

Par exemple en Algérie, 41 incendies répartis sur 9 wilayas ont eu lieu en mois d'août 2021 (A.P. S. 16/08/2021).

Lors de ces incendies 1700 habitations ont été touchées ce qui a nécessité une expertise par les services techniques du CTC Tizi-Ouzou (A.P.S. 16/08/2021).

Le béton ou les éléments de l'enveloppe des bâtiments en service peuvent être exposés aux hautes températures. Donc les bétons et les mortiers doivent avoir une certaine résistance aux hautes températures.

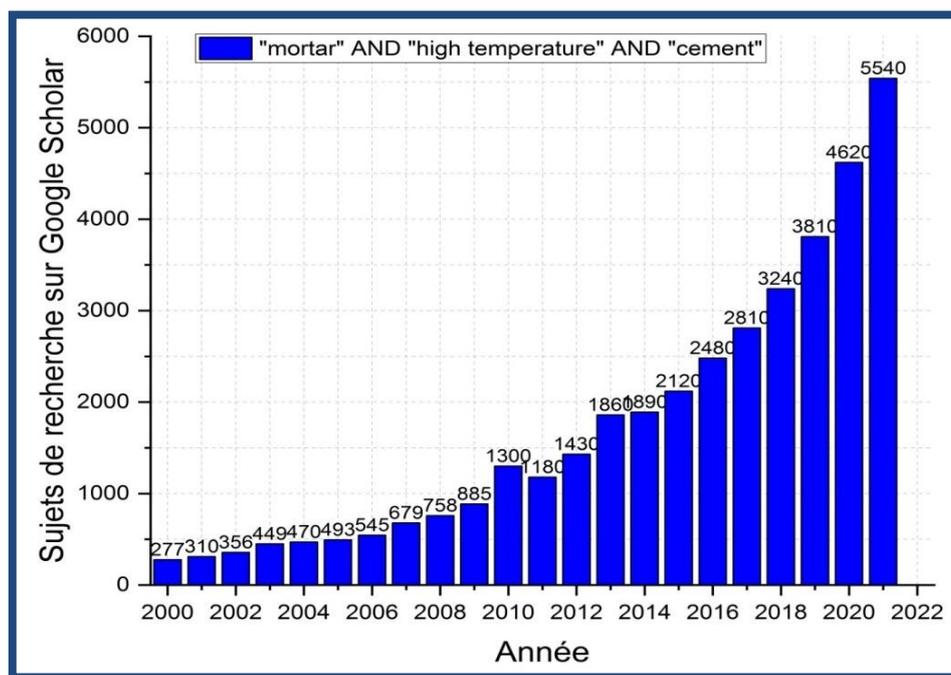


Figure 3. 6- Sujets de recherche du sujet sur Google Scholar depuis l'An 2000 (Belghit, A. 2022).

La détérioration du béton et des mortiers se passe pendant ou après l'exposition aux hautes températures (Liu, Y, 2022). Lors des incendies la température appliquée sur le béton ou les éléments de l'enveloppe de la structure telle que le mortier peut atteindre 1000°C (Saridemir, M. 2022).

La Figure 3.6 montre que les recherches sur l'influence des hautes températures sur le mortier à ciment sont croissantes, en 2021 5540 titres ont été publiés sur le même sujet ce qui prouve que ce paramètre est un sujet d'actualité (Moteur de recherche scientifique, Google Scholar. 2022).

Entre 60°C et 70°C l'ettringite se décompose et risque la formation différée de l'ettringite dans le béton (Escadeillas, G. 2007). Entre 350°C à 550°C, c'est le premier effet remarquable de la chaleur sur le béton (Zahedi, F, 2022), le CH (la portlandie) se décompose en CaO (Chaux) dont la réhydratation cause une extension de 44% durant la période de refroidissement, à ce stade le béton perd 20% de sa Rc (Saridemir, M. 2022, Liu, Y. 2022).

À partir de 300 °C, l'eau chimiquement combinée dans les C-S-H s'évapore et après dessiccation complète des pores l'apparition des microfissures autour des granulats (Liu et al, 2022) ce qui est dû aux pressions d'évaporation et de gradient thermique (Figure 3.7-b).

Ahsan, M. H en 2022 a reporté que la faible conduction de la température de la couche externe exposée au feu à l'intérieur du béton crée une inertie thermique ce qui

provoque un gradient de chaleur et cause un effort thermique qui est en réalité un effort de traction sur le béton provoquant des fissures de la matrice cimentaire et l'élargissement de ces fissures provoque les écaillages du béton.

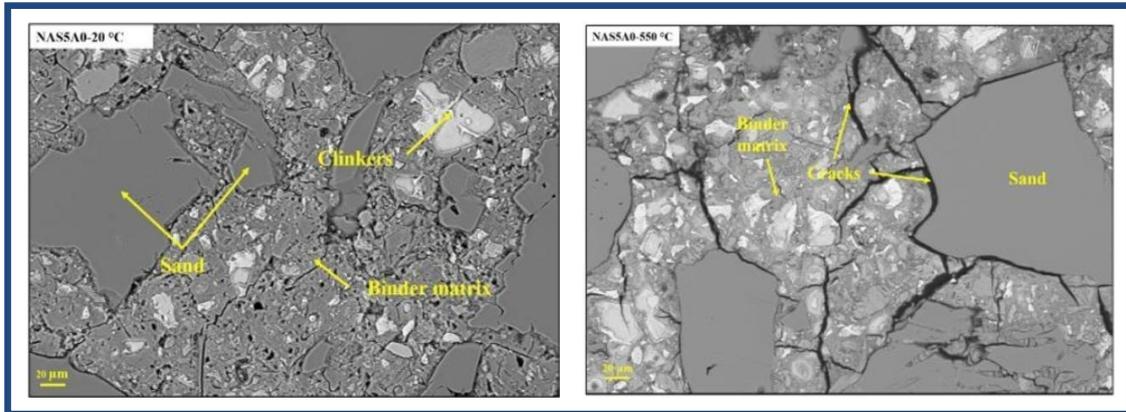


Figure 3. 7- L'effet des hautes températures sur un mortier à base d'un ciment contenant 5% de fumée de silice : (a) 20°C, (b) 550°C (Liu, Y. 2022).

Quand la température atteint les 550°C et 800°C les fissures continuent de devenir plus importantes et la liaison entre l'agrégat et le liant échoue ce qui se traduit pratiquement par une chute de résistance à la compression (Liu, Y. 2022).

En général les bétons perdent 50 à 80 % de leurs résistances à la compression entre 600°C jusqu'à 800°C à température où la déshydratation est complète (Liu, Y. 2022).

Plusieurs travaux ont souligné qu'une température allant jusqu'à 600°C diminue le comportement mécanique des mortiers. À 900°C, une perte totale des capacités mécaniques (Zahedi, F. 2022). Ahsan M. H en 2022 a souligné que lorsque l'eau s'évapore, il provoque des pressions de traction sur la matrice du béton se cause les écaillages sur la surface du béton lorsque ces pressions atteignent une certaine valeur.

Entre 700°C à 900 °C, le C-S-H se décompose conduisant à une chute totale de R_c accompagnée par l'apparition des écaillages sur le béton (Saridemir, M, 2022) (Figure 3.8). Ahsan, M. H en 2022 a noté que les hautes températures provoquant des pressions thermiques dues au différentiel de l'inertie thermique et qui sont parmi les causes principales des écaillages apparus sur le béton.

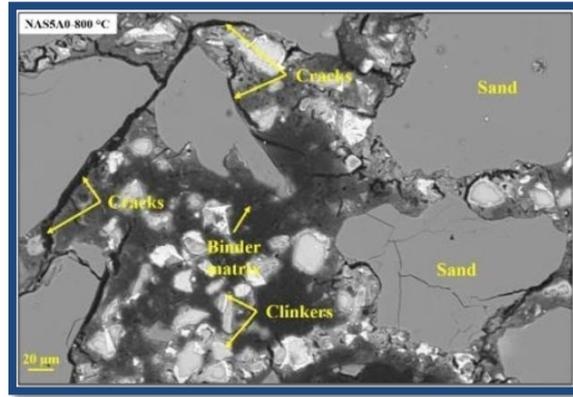


Figure 3. 8- L'effet des hautes températures sur un mortier à base d'un ciment contenant 5% de fumée de silice à 800°C (Yue, L. 2022).

Liu, Y en 2022 a reporté que les facteurs influant la résistance à la compression et des mortiers après avoir été exposés aux hautes températures sont : les propriétés de la pâte du ciment et les agrégats, la liaison entre les agrégats et le ciment, quelques facteurs environnementaux, la durée d'exposer aux hautes températures ainsi que le type et la méthode de refroidissement.

Les raisons de la meilleure résistance des matériaux pouzzolanique par rapport au ciment portland sont dues à la consommation de la Portlandite (CH) sensible aux hautes températures et après déshydratation ça induit à l'extension de 44% due à la réhydratation (Liu, Y. 2022).

Il a été noté par Malhotra en 1956 que le rapport granulats ciment affecte la résistance à la compression des bétons sous l'effet des hautes températures et que la résistance du béton entre 200°C à 450°C perd 20% de sa résistance (Zahedi, F. 2022).

D'après l'étude bibliographique de plusieurs travaux d'essai de l'effet des mortiers aux hautes températures, il peut être souligné l'inexistence d'une méthode suivie par l'ensemble de chercheurs pour étudier le comportement des mortiers vis-à-vis des hautes températures (Zahedi, F. 2022).

III. 6. La conductivité thermique

Lors de la conception d'un bâtiment, il est indispensable de prendre en considération les techniques et les matériaux nécessaires pour assurer le confort thermique des habitants et de réduire la consommation en énergie (Fabiani, C. 2018, Al-Jabri, K. S. 2005).

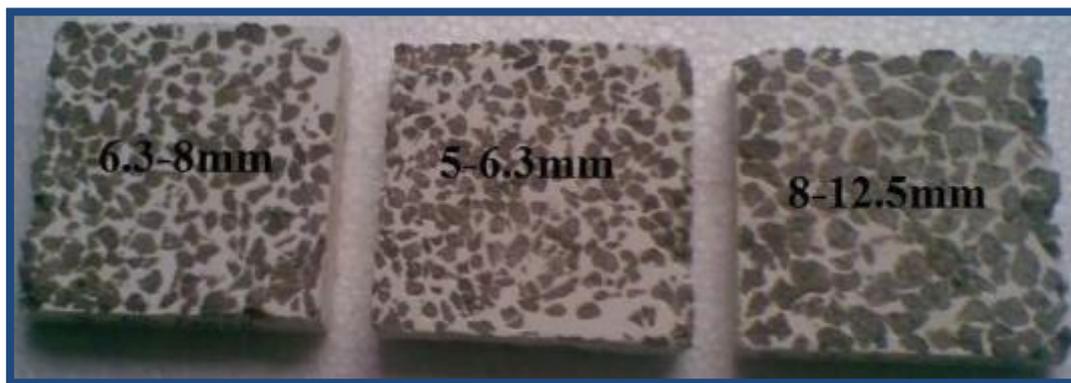


Figure 3. 9- Introduction du liège avec différents diamètres pour réduire la conductivité thermique des ciments.

Plusieurs matériaux ont un bon rendement en matière isolation thermique des bâtiments tels que les isolants synthétiques (polyuréthane, polystyrène, laine de verre ou de roche, déchets de mousse... etc.) (Osseni, S. OG, 2016, Mounanga, P, 2006), Néanmoins, les inconvénients que l'on peut tirer de l'utilisation de ces matériaux sont le cout élevé ce qui nécessite de chercher des matériaux moins couteux (Osseni, S. OG, 2016).

Sur le globe terrestre, un taux de 67% des habitations est situé dans les pays à climat froid et le reste dans les pays à climat chaud dont ils nécessitent de l'énergie pour assurer le confort thermique (chauffage, climatisation, ventilation). Cependant, le bâtiment d'aujourd'hui consomme 35% du totale en énergie sur globe terrestre ce qui augmente les dégagements de CO₂ (Fabiani, C. 2018).

La conductivité thermique (CT) correspond à la propriété physique du transfert de chaleur, indique la quantité de chaleur par unité de surface pouvant être générée par un plan ayant une épaisseur unitaire d'un matériau donné (1 m) assurant la variation de la température par une unité de (1 K) (Fabiani, C. 2018).

Il est connu que la conductivité thermique des bétons est élevée par rapport à celle de l'air, ce qui a conduit les chercheurs à introduire des vides ou des matériaux comme le polystyrène et le liège pour réduire la conductivité thermique des éléments non porteurs constituant l'enveloppe des bâtiments (Figure 3.9 et 3.10) et d'assurer le confort des habitants (Al-Jabri, K. S.2005, Dixit, A. 2019, Duan, P. 2017, Gomes, M. G. 2019, La Rosa, A. D. 2014).

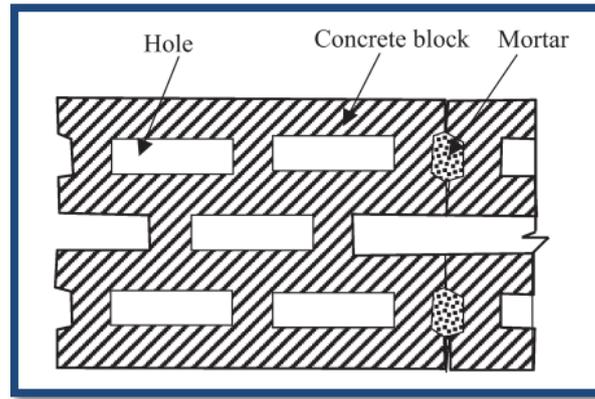


Figure 3. 10- Système de blocs en béton reliés par des joints de mortier verticaux, proposés pour réduire la conductivité thermique des murs extérieurs (Al-Jabri, K. S.2005).

Plusieurs caractéristiques peuvent influencer la conductivité thermique à savoir: la densité, la porosité, l'humidité, la température, les types d'agrégats le volume par fraction la finesse des agrégats le rapport E/C le type de ciment le type des minéraux utilisé l'âge et les conditions de cure (Hamadache, M. 2016; Cseh, Á. 2021).

Demirboğa, R en 2003 a reporté que plusieurs types des APSC tels que la fumée de silice, les cendres volantes (la classe C) et la granulée des hauts fourneaux utilisés comme substituant partiels du ciment augmente l'isolation thermique du ciment par rapport au ciment Portland proportionnellement avec le taux de remplacement

Hamdache, M en 2016 a prouvé que l'utilisation de la perlite de Hammam Boughrara Tlemcen dans un mélange binaire ou ternaire avec le ciment et la pouzzolane naturelle diminue la conductivité thermique de ciment.

L'influence de l'eau sur la conductivité thermique est grande 25 fois que l'air (Demirboğa, R. 2003), la conductivité thermique de l'eau est 0.598 W/MK et l'air 0.0259 W/MK à 20°C (Francioso, V. 2021). En général la conductivité thermique est plus importante dans la présence d'humidités entre 1.4 à 3 fois dans les conditions sèches (Francioso, V. 2021).

Il existe plusieurs essais pour la détermination de la conductivité thermique basés sur deux principales méthodes : la méthode d'état d'équilibre et la méthode transitoire (Gomes, M. 2018). La plus directe, rapide et plus simple méthode pour déterminer la conductivité thermique spécialement pour les petits échantillons de béton et de mortiers est la méthode transitoire (Gomes, M. 2018). L'appareillage utilisé dans cette méthode est équipé par une

source émettrice de chaleur électrique impulsive et pour mesurer la réponse, mais ça existe d'autres méthodes plus compliquées qui peuvent être utilisées (Gomes, M. 2018).

III. 7. Conclusion

Tel qu'il a été discuté en détail dans le présent chapitre, en plus aux caractéristiques intrinsèques à savoir la résistance à la compression et le comportement à l'état frais, chaque type de ciment doit être examiné en fonction des différents types d'attaques et des critères techniques permettant une meilleure utilisation au cours de la conception des constructions. Pour le cas échéant, l'évaluation de la vase calcinée en tant qu'addition substituable au ciment a été évaluée dans plusieurs travaux expérimentaux pour tester sa faisabilité. Mais ces travaux doivent être poursuivis pour plus de maturité des études permettant à son intégration dans l'industrie du ciment. Les paramètres à étudier dans ce travail à savoir l'attaque interne des sulfates, attaque à l'acide chlorhydrique, résistance aux hautes températures, et la conductivité thermique du matériau sont nécessaires pour de diverses utilisations telles que le développement des bétons à hautes performances ou utilisation pour remplissage et crépissage comme les mortiers.

Problématique et Axes de recherche

Problématique et Axes de recherche

Durant les vingt dernières années, l'Algérie a été marquée dans le domaine des matériaux de construction par l'existence d'un déchet naturel renouvelable du secteur hydraulique disponible en quantités dépassant les 120 millions m³ annuellement à savoir la vase des barrages. Ce matériau passe par un tamisage naturel après arrachement des particules par les eaux pluviales et écoulement dans les cours d'eau vers les retenues des barrages résultant un matériau de grande finesse de l'ordre de 7000 cm²/g qui se stagne par la suite au fond des barrages par le phénomène de décantation. Sa teneur en métakaolin le rend réactif après traitement thermique avec une température de 750 °C durant 5 heures dont il devient apte à être utilisé comme un matériau pouzzolanique en tant qu'addition partiellement substituable au ciment avec des taux allant jusqu'à 30%.

A l'état frais le ciment contenant la vase calcinée est caractérisé par une diminution d'ouvrabilité en fonction du taux de remplacement, des résistances à la compression meilleures que celle de la pouzzolane naturelle à court et à long terme, sa teneur en dioxyde de silicium réactif (SiO₂) lui offre une capacité de réagir avec la chaux libre et la portlandite pour produire des C-S-H de second degré (réaction pouzzolanique) ce qui a été traduit par l'augmentation des résistances à la compression à long terme après l'âge de 120 jours. Vu l'importante finesse à l'échelle nano et microparticules la vase calcinée joue un rôle filler et participe à la densification de la structure des bétons et des mortiers ce qui est favorable pour la durabilité. Aussi, l'utilisation de la vase calcinée diminue la chaleur d'hydratation du ciment et surtout pour le taux de remplacement de ciment par 20% ce qui diminue les fissures dans les bétons produits.

Plusieurs programmes expérimentaux ont été élaborés afin d'évaluer les effets dus à l'utilisation de la vase calcinée en tant qu'APSC sur les bétons et les mortiers après être exposés aux attaques sulfuriques, attaques acides, carbonatation, attaque de l'eau de mer avec un avantage des bétons à base de la vase calcinée par rapport au ciment seul. L'étude élaborée

par l'auteur O. Safer, 2017 sur la résistance des bétons ordinaires contenant 10%, 20% et 30% de la vase calcinée vis-à-vis de l'attaque de l'acide sulfurique a montré un comportement similaire entre le béton témoin et les bétons contenant des taux de 10 et 20% de vase. Mais, l'effet de l'introduction de la vase calcinée contre l'attaque de l'acide chlorhydrique n'a pas été bien évaluée vu que seul O. Belaribi dans des formulations de bétons autoplaçants (BAP) a suivi la résistance de ces BAP contenant un taux de remplacement de 20% par les sédiments calcinés de barrage Chorfa, et il a noté une meilleure résistance à celui du BAP témoin (à base d'un ciment CEMI). Le comportement des bétons à base de la vase calcinée des barrages en tant que qu'addition partiellement substituable au ciment sous l'effet des attaques externes des sulfates a été bien étudié par les auteurs O. Safer et O. Belaribi, néanmoins le comportement vis-à-vis d'une attaque interne des sulfates (I.S.A) n'a pas eu encore lieu. Autrement, l'utilisation de la vase calcinée des barrages en tant qu'APSC n'a pas été encore évalué pour utilisation en tant que matériaux de remplissage tels que les mortiers de crépissage des façades extérieurs constituant l'enveloppe des bâtiments.

Actuellement, les installations dans les cimenteries en Algérie ne permettent pas un commencement de production directe des argiles calcinées, ce qui nécessite pour une première période d'étudier la faisabilité d'une intégration partielle de la vase calcinée avec la pouzzolane naturelle pour la première période en attendant une production capable à suffire les besoins du secteur.

Donc plusieurs questions peuvent être posées pour développer du présent travail ; est-il faisable d'élaborer une combinaison de 50% de la vase calcinée et 50% de la pouzzolane naturelle en tant qu'addition partiellement substituable au ciment permettant l'intégration partielle de la vase calcinée dans l'industrie du ciment ?, Quels sont les effets de ces combinaisons sur le ciment portland et par rapport aux ciments à base d'une seule APSC (pouzzolane naturelle ou la vase calcinée) ? quels sont les taux de remplacement optimaux d'utilisation de la vase calcinée, la pouzzolane naturelle et la combinaison entre les deux ajouts pour résister aux attaques à l'acide chlorhydrique, l'attaque interne des sulfates, la résistance aux hautes températures ? Quel est l'effet de la vase calcinée sur la conductivité thermique des mortiers ? Y a-t-il une différence APSC utilisés seul ou en combinaisons sur la conductivité thermique des mortiers ? Quels sont les types de ciments à base des APSC qui sont proposés pour utilisation pour le développement des bétons à hautes performances et celles pour utilisation en tant que matériaux de remplissage constituant l'enveloppe des bâtiments ?

Ce travail s'inscrit dans un cadre général d'enrichir les compétences sur l'utilisation de la vase calcinée en tant que substituant partiel au ciment dont il vise à compléter les investigations par étudier la faisabilité des nouvelles combinaisons binaires et ternaires entre le ciment portland, la vase calcinée des barrages et la pouzzolane naturelle facilitant l'intégration de ce déchet dans l'industrie du ciment. Cependant, ce programme expérimental a été élaboré afin d'étudier l'effet d'utilisation des combinaisons binaires et ternaires sur le comportement des mortiers à l'état frais, à l'état durci, la durabilité de façon à évaluer l'utilisation de la vase calcinée dans les éléments structuraux tels que les bétons et des matériaux de remplissage pour la constitution de l'enveloppe des bâtiments.

Chapitre IV: Matériaux utilisés

Chapitre IV : Matériaux utilisés

IV. 1. Introduction

Ce chapitre définit les matériaux utilisés dans l'expérimentation développée dans la présente recherche, les critères de choix de ces matériaux, la méthode d'extraction, préparation et utilisation conformément aux textes de normalisations en vigueur.

IV. 2. Le ciment

Le ciment utilisé dans le présent travail est un CEMI 42.5 (Figure 4.1) provenant de la cimenterie de Zahana à la wilaya de Mascara, conforme à la norme Algérienne NA 442 et la normalisation Européenne NF EN 197-1, dont les caractéristiques physiques sont présentées dans le Tableau 4.1, la composition chimique dans le Tableau 4.2 et la composition minéralogique du clinker selon les formules de Bogue dans le Tableau 4.3.



Figure 4. 1- Ciment CEMI 42.5.

Tableau 4. 1- Caractéristiques physiques du ciment CEMI.

Propriétés	Masse Volumique Absolue (g/cm ³)	Finesse suivant la méthode Blaine (cm ² /g)
Ciment CEMI	3.14	3285

Tableau 4. 2- Composition chimique du ciment CEMI.

Constituants	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	So ₃ (%)	Cl (%)
Ciment CEMI	20.72	04.56	4.98	63.24	0.21	0.79	1.82	2.54	0.05

Tableau 4. 3- Composition minéralogique du clinker calculée selon les formules de Bogue.

Composants	C ₃ S (%)	C ₃ A (%)	C ₂ S (%)	C ₄ AF (%)
Ciment CEMI	62.22	3.66	12.26	15.15

IV. 3. La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle utilisée est celle de Beni Saf fournie par la cimenterie GICA- Zahana wilaya de Mascara à l'état naturel (Figure 4.2-à), transportée au laboratoire lavé, séchée et broyée par un broyeur à boulettes (Figure 4.2-b), passée dans des tamis de 63 µm (Figure 4.2-c), les paramètres d'identifications sont présentés dans les Tableaux 4.4 et 4.5.



(a) (b) (c) (d)
Figure 4. 2: Etapes de préparation de la pouzzolane naturelle : la pouzzolane avant broyage (a), Broyeur à boulettes (b), Tamis (c) et la pouzzolane naturelle prête pour utilisation (d).

Tableau 4. 4- Les caractéristiques physiques de la Pouzzolane naturelle.

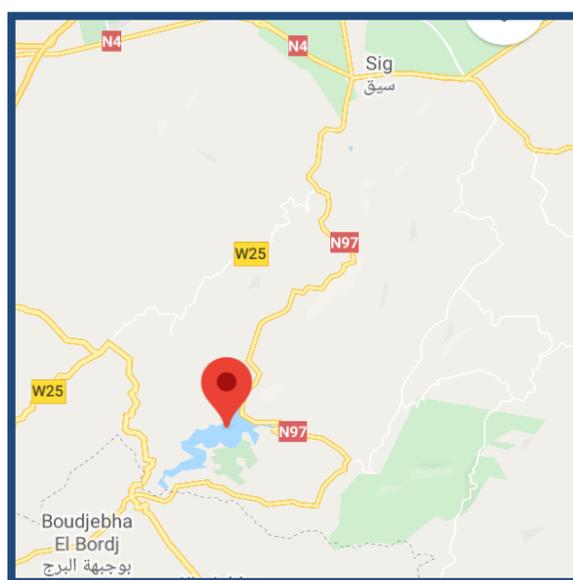
Propriétés	Masse Volumique Absolue (g/cm ³)	Finesse suivant la méthode Blaine (cm ² /g)	Indice d'activité pouzzolanique < i %>	pH
Pouzzolane naturelle	2.50	4323	86	8.92

Tableau 4. 5- La composition chimique de la Pouzzolane naturelle.

Constituents	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	So ₃ (%)	Cl (%)
Pouzzolane naturelle	44.33	12.77	11.26	16.48	0.10	0.18	3.62	0.20	0.01

IV. 4. La vase calcinée

Les sédiments de barrage Chorfa ont été extraits de la vanne de vidange de barrage Chorfa (Figure 4.3, 4.4).

**Figure 4. 3-** position géographique du barrage (a) photo du site du barrage

Ensuite, transportés au laboratoire, séchés à l'air libre pendant quelques jours (Figure 4.5-b), la vase a été calibrée à des dimensions de 25 mm (Figure 4.5-c), passée à l'étuve avec une faible température d'étuve (40°C) jusqu'à l'élimination de l'eau (Figure 4.5-e), broyée par un broyeur à boulettes (Figure 4.5-g), tamisée dans des mailles de 63 µm (Figure 4.5-j), et enfin traitée thermiquement dans un four de calcination à une température de 750°C pendants

5 heures avec une hausse de température de 5°C/Min (Figure 4.5-h) selon le procédé de (Semcha, A. 2006).



Figure 4. 4- Barrage Chorfa 2 Wilaya de Mascara.

Tableau 4. 6- Caractéristiques physiques de la Vase calcinée.

Propriétés	Masse Volumique Absolue (g/cm ³)	Finesse suivant la méthode Blaine (cm ² /g)	Indice d'activité pouzzolanique « i % »	pH
La vase calcinée	2.58	7190	92	10.51

Tableau 4. 7- Composition chimique de la vase calcinée.

Constituants	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	Na ₂ O(%)	K ₂ O(%)	MgO(%)	So ₃ (%)	Cl (%)
La vase calcinée	49.22	12.11	07.23	23.99	0.44	3.22	2.45	0.13	0.00

Les Tableaux 4.6 et 4.7 montrent les caractéristiques physiques et chimiques de la vase calcinée de barrage Chorfa.



Figure 4.5- Etapes de préparation de la vase calcinée : Extraction (a), vase à l'état naturel (b), concasseur (c), vase calibrée (d), Etuve (e), Tamisage (f), Broyage (g), Calcination (h), Vase calcinée prête pour utilisation.

IV. 5. Les agrégats

Deux types d'agrégats utilisés dans le programme expérimental dont un sable fin naturel alluvionnaire silicieux d'Oued El Kheir wilaya de Mostaganem (Figure 4.6-a) et un sable concassé de nature calcaire du gisement de Terga wilaya de Ain Temouchent (Figure 4.6-b).

En premier lieu, les deux sables ont été extraits ensuite lavés dans les tamis 63 μm jusqu'à l'élimination des fines avec conservation des fines de sable concassé, passés à l'étuve jusqu'à leurs séchages. Les résultats de caractérisation technique et de composition chimiques des deux sables sont montrés dans les Tableaux 4.8 et 4.9 et les courbes granulométriques dans la Figure 4.7.

Pour avoir un sable remplissant les prescriptions techniques de la normalisation NF EN 18-545, nous avons effectué un mélange des deux sables (40% de sable alluvionnaire 0/1 d'Oued el Kheir et 60% de sable concassé 0/4 de Terga) d'une façon à avoir un mélange qui se conforme avec les fourchettes définies par cette norme (NF EN 18-545). Dont la courbe granulométrique du mélange présentée dans la Figure 4.7.



Figure 4. 6- Sables utilisés : (a) sable alluvionnaire d'Oued el Kheir, (b) Sable concassé de Terga.

Tableau 4. 8- Caractéristiques techniques de sable alluvionnaire de Oued el Kheir.

Propriétés	Masse Volumique Absolue (g/cm ³)	Module de Finesse	Equivalent de sable	Impuretés prohibés	Coefficient d'absorption	Matière Organique	pH
Sable alluvionnaire	2.70	1.48	84.26	Néant	1.53	0.59	9.53
Sable concassé	2.73	3.70	89.79	Néant	4.12	0.69	9.95

Tableau 4. 9- Composition chimique du sable alluvionnaire de oued el Kheir.

Constituants	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	So ₃ (%)	Cl(%)	Na ₂ O(%)
Sable alluvionnaire	86.90	0.00	0.39	11.68	0.00	0.0213	0.00
Sable concassé	10.89	0.33	0.78	74.77	0.00	0.0284	0.00

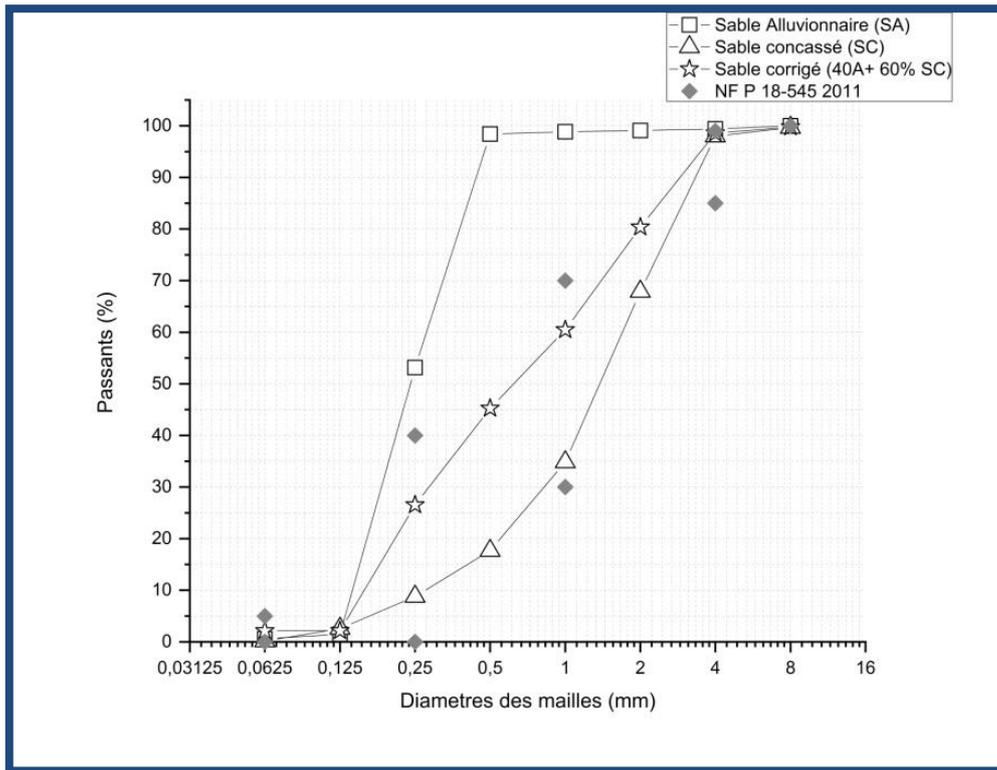


Figure 4. 7- Courbes granulométriques de sables.

IV. 6. Conclusion

La caractérisation technique de la vase calcinée donne un pré avis sur des qualités prometteuses concurrentes aux matériaux utilisés partout dans le monde et présente des indications préliminaires sur le déchet local à valoriser. Mais afin de répondre à la demande locale dans la matière, il est temps d'introduire de nouveaux équipements spécialisés dans la calcination des argiles permettant à faciliter la production de la vase calcinée par les cimenteries.

Chapitre V: Procédures et méthodes expérimentales

Chapitre V : Procédures et méthodes expérimentales

V. 1. Introduction

Pour concrétiser les objectifs prévus initialement concernant la valorisation d'utilisation de la vase calcinée des barrages en tant qu'addition substituable partiellement au ciment, un plan de travail à partir d'un programme expérimental a été établi (Figure 5.1).

Dans le programme expérimental, neuf ciments modifiés par l'introduction des deux types d'ajouts pouzzolaniques locaux (la vase calcinée des barrages et la pouzzolane naturelle) ont été évalués et comparés au ciment portland dans des formulations de mortiers fabriqué selon les recommandations décrites par normalisation européenne NF EN 196-1.

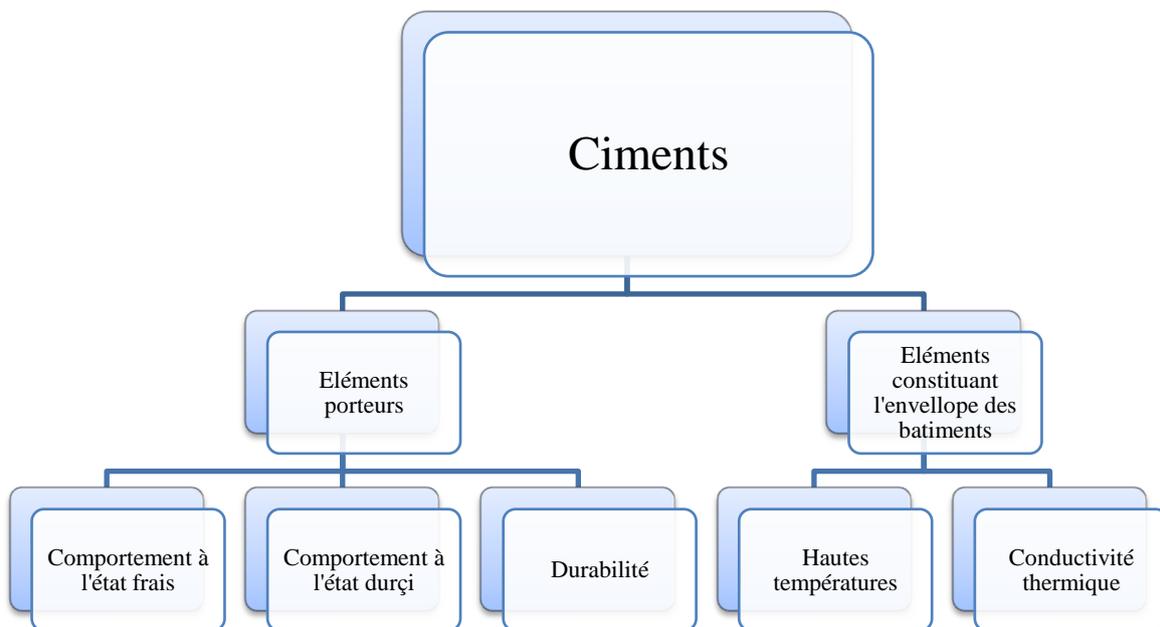


Figure 5. 1- Caractérisation technique des matériaux selon l'utilisation.

Le présent chapitre vise à présenter les procédures et méthodes expérimentales permettant la concrétisation des objectifs dont la méthode de préparation des mélanges et de

fabrication des mortiers, les essais d'identification des pâtes et des mortiers à l'état frais (essai de consistance normalisée, essais de temps de prise, essai de maniabilité) ont été décrites.

Aussi, des essais sur les mortiers à l'état durci (Compression, Absorption d'eau, densités apparentes), des essais de durabilité (Attaque à l'acide chlorhydrique, Attaque interne des sulfates de sodium, Résistance aux hautes températures), des essais de mesure de conductivité thermique et des vues avec le microscope à balayage (MEB) ont eu lieu.

V. 2. Formulation des mortiers

Les formulations des mortiers ont été développées en conformité de la norme NF EN 196-1 avec des rapports massiques Sable : Ciment : Eau égal à 3 : 1 : 0.5 pour le mortier témoin (MT) et pour les neuf autres un ajustement de la quantité d'eau à l'aide d'un maniabilimètre type B (Figure 5.2) selon les normes NF EN18-452 et NF EN 15-437, de façon à assurer une maniabilité équivalente de l'ensemble des mortiers, afin d'éviter un manque d'eau de gâchage.

L'essai de maniabilité est un moyen permettant de mesurer la fluidité des mortiers conformément aux normes NF P18-452 et NF P 15-437, Il s'effectue à l'aide d'un appareil en forme de boîtier parallélépipédique 60×30×30 mm équipé par un vibreur muni d'une cloison amovible appelé "Manabilimetre B" comme montré dans la Figure 5.2 (Dupain, R. 1995).



Figure 5. 2- Maniabilimetre type B.

Après avoir rempli la chambre derrière la cloison, on retire cette cloison, le vibreur d'éclanche et ouvre la voie pour l'écoulement du mortier dans la boîte, le temps nécessaire

pour l'écoulement du mortier dans la boîte jusqu'à atteindre un trait marqué dans la boîte et le résultat de l'essai de maniabilité NF P18-452 et NF P 15-437 (Dupain, R. 1995).

L'objectif de cet essai est de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour une maniabilité équivalente pour l'ensemble des mortiers, ce qui a été traduit par les quantités d'eau nécessaires pour chaque formulation citée dans le Tableau 5.1.

Afin de déterminer la fourchette optimale de remplacement du ciment par les additions utilisés à savoir la vase calcinée et de pouzzolane naturelle influençant l'efficacité d'utilisation des additions dans des formulations de mortiers. Des essais de mesure de la résistance à la compression ont été conduits sur des éprouvettes de mortiers normalisés de formes prismatiques $40 \times 40 \times 160$ mm (Figure 5.3) dont le remplacement des taux de ciments avec 10%, 30% et 50% de la vase calcinée et la pouzzolane naturelle pour les échéances suivantes : 3, 7, 14 et 28 jours.



Figure 5. 3- Des éprouvettes de mortiers de forme prismatique $40 \times 40 \times 160$ mm.

Les résultats obtenus et montrés par la Figure 5.4 indiquent que les additions utilisées sont efficaces pour des taux de remplacement du ciment compris entre 10 et 30 % qui ont été traduits par des valeurs de résistance à la compression proches de celles du mortier témoin (à base de ciment Portland).

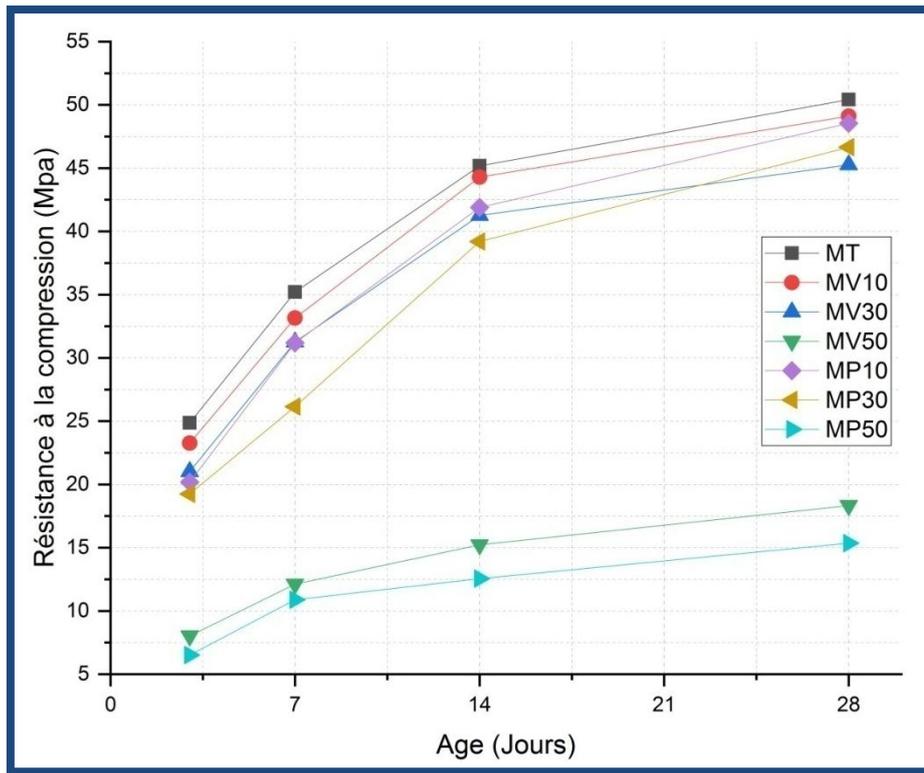


Figure 5.4- Résistances à la compression des mortiers normalisés contenant 10%, 30% et 50% de la vase calcinée et la pouzzolane naturelle.

Ce domaine d'utilisation est conforme aux résultats obtenus et cités dans la bibliographie dont les taux de remplacement du ciment sont compris entre 10% et 30%.

Tableau 5.1- Formulations des mortiers et des pâtes.

Désignation Des Ciments modifiés	Désignation des Mortiers	Sable (g)	Ciment CEMI (g)	Vase Calcinée (g)	Pouzzolane Naturelle (g)	Eau (g)	Eau supp (g).	E/L			
									Ciments modifiés		
									Formulations des Mortiers		
CT	MT	1350	450	0	0	225	0	0,5			
CV10	MV10	1350	405	45	0	225	4.5	0,51			
CV20	MV20	1350	360	90	0	225	15.75	0,535			
CV30	MV30	1350	315	135	0	225	22.5	0,55			
CP10	MP10	1350	405	0	45	225	2.25	0,505			
CP20	MP20	1350	360	0	90	225	11.25	0,525			
CP30	MP30	1350	315	0	135	225	18	0,54			
CV5P5	MV5P5	1350	405	22.5	22.5	225	4.5	0,51			
CV10P10	MV10P10	1350	360	45	45	225	13.5	0,53			
CV15P15	MV15P15	1350	315	67.5	67.5	225	20.25	0,545			

Note :

- **T : Témoin.**
- **V10 :10% de la vase calcinée pour le remplacement du ciment CEMI.**
- **V20 : 20% de la vase calcinée pour le remplacement du ciment CEMI.**
- **V30 : 30% de la vase calcinée pour le remplacement du ciment CEMI.**

- **P10: 10% de la pouzzolane naturelle pour le remplacement du ciment CEMI.**
- **P20: 20% de la pouzzolane naturelle pour le remplacement du ciment CEMI.**
- **P30: 30% de la pouzzolane naturelle pour le remplacement du ciment CEMI.**
- **V5P5: 5% de la vase calcinée et 5% de la pouzzolane naturelle pour le remplacement du ciment CEMI.**
- **V10P10: 10% de la vase calcinée et 10% de la pouzzolane naturelle pour le remplacement du ciment CEMI.**
- **V15P15: 15% de la vase calcinée et 15% de la pouzzolane naturelle pour le remplacement du ciment CEMI.**

Au-delà de 30 à 35% de remplacement en remarque une chute des résistances à la compression due à l'effet de dilution ce qui prouve que les additions utilisées sont de nature pouzzolanique dont l'ordre d'utilisation pour le remplacement des ciments est inférieur à 35%.

V. 3. Fabrication et préparation des mortiers

Les mélanges montrés dans le Tableau 5.1, ont été malaxés par un malaxeur « CONTROLAB » (Figure 5.4) conformément à la norme NF EN 196-1 par la méthode décrite dans le Tableau 5.2 avec le respect des étapes suivantes:

- Introduire du sable dans le récipient ensuite le ciment.
- Mettre le malaxeur en marche avec une vitesse lente pendant 30 secondes.
- Verser de l'eau pendant les 30 secondes qui suivent.
- Mettre la vitesse du malaxeur pendant 60 secondes plus rapides.
- Ensuite arrêter le malaxage pendant 15 secondes pour l'enlèvement du mortier adhérent aux parois et au fond du récipient.
- Et comme dernière étape mettait le malaxeur en marche avec une vitesse rapide.

Tableau 5. 2- Méthode de malaxage des mortiers.

Opérations	Introduire du sable	Introduire du ciment		Introduction de l'eau		Raclage de la cuve	
Durée			30 s	30 s	60 s	15 s	60 s
Etat de malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt	Vitesse rapide

Le moulage des mortiers a été effectué en deux couches dont chaque couche a été compactée sur une table vibrante pendant 30 secondes pour élimination maximale des bulles d'air ensuite les faces supérieures des moules ont été lissés à l'aide d'une raclette afin d'enlever l'excès du mortier et d'assurer un surfaçage des faces supérieures.



Figure 5. 5- Malaxeur de mortier CONTROLAB.

Trois types d'éprouvettes ont été confectionnées à savoir des éprouvettes prismatiques $40 \times 40 \times 160$ mm (Figure 5.3) par des moules métalliques normalisés conformés à la normalisation en vigueur (NF EN 196-1), des éprouvettes cubiques de 50 mm (ASTM, C109) (Figure 5.7-a) et des barres $25 \times 25 \times 285$ mm équipées par des plots normalisés adaptatifs à la sonde du comparateur (Figure 5.7-b) (ASTM, C452-15).



Figure 5. 6- Confection des éprouvettes prismatiques $40 \times 40 \times 160$ mm.

Ces deux derniers types d'éprouvettes (cubes 50 mm et barres 25×25×285 mm) ont été confectionnées dans des moules fabriqués en bois protégés par une peinture assurant leurs étanchéités (Figure 5.7).



(a)

(b)

Figure 5.7- Mortiers à l'état frais confectionnés et protégés par un film plastique : Moules 3x cubes de 50 mm (a) et des moules 3x barres de 25×25×285 mm.

Les moules ont été protégés par un film plastique pendant 24 heures (Figure 5.7), après cette échéance les éprouvettes ont été démoulées (NF EN 196-1).



Figure 5.8- Cure à eau saturée en chaux.

Ensuite les éprouvettes durcies sont mises en cure dans l'eau saturée en chaux avec une température de 20°C (Figure 5.8) afin d'éviter la dissolution de la portlandite jusqu'au jour de l'essai.

V. 4. Procédures et essais

V.4.1. Essais sur pâtes et mortiers à l'état frais

V.4.1.1. Essai de consistance des pâtes

La consistance normalisée et le temps de prise des pâtes ont été déterminés par l'appareil Vicat (Figure 5.9) selon la norme NF EN 196-3, le ciment témoin et les ciments modifiés (Tableau 5.1) contenant des mélanges binaires et ternaires entre le ciment CEMI et les deux additions objet du présent travail, ont été mises à l'épreuve par les aiguilles de Vicat (NF EN 196-3).

Le malaxage des pâtes effectué par le même malaxeur utilisé pour le mortier avec une quantité de 400 g de ciment pour un seul essai, avec le respect des mêmes étapes utilisées pour le malaxage des mortiers.

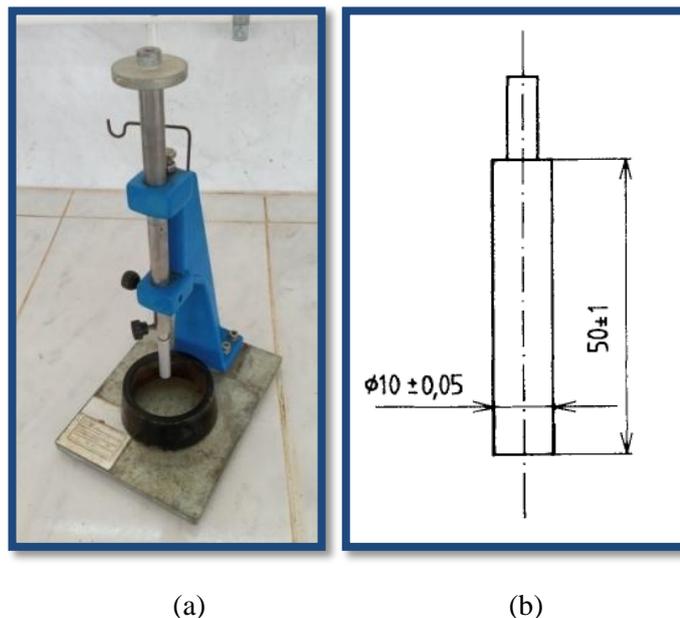


Figure 5. 9- Appareil Vicat pour la détermination de la consistance normalisée et le temps de prise : Appareil Vicat (a), Aiguille pour la détermination de la consistance normalisée (b).

L'essai de consistance normalisée des ciments consiste à faire pénétrer une sonde normalisée d'un diamètre de 10 mm (Figure 5.9-b) chargée en tête par un poids de 300 g dans un Moule en caoutchouc dure rempli par la pâte, et de mesurer la profondeur de pénétration de la sonde jusqu'à atteindre la profondeur de pénétration normalisée 4 mm +/- 1 mm.

L'essai a été refait par augmenter légèrement la quantité d'eau l'eau jusqu'à atteindre la profondeur de pénétration décrite précédemment avec un rapport Eau/Ciment (E/C) initial est de 0.25.

V.4.1.2. Temps de début de prise et de fin de prise

La détermination du temps de début de prise des ciments, c'est de faire pénétrer une aiguille spéciale pour l'essai avec un diamètre de 1.13 mm (Figure 5.10-b) dans les mêmes moules rempli par les pâtes avec une consistance normalisée et de mesurer la profondeur de pénétration jusqu'à atteindre 2.00 mm +/- 1mm et le temps de début de prise à prendre en considération c'est le temps à compter du premier contact entre l'eau et le ciment (NF EN 196-3).

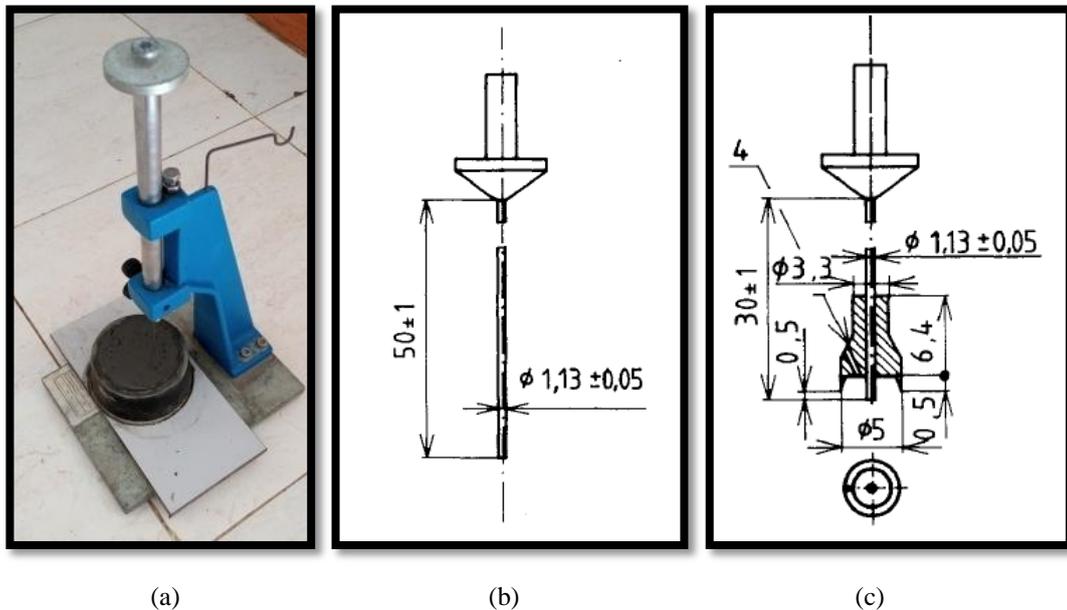


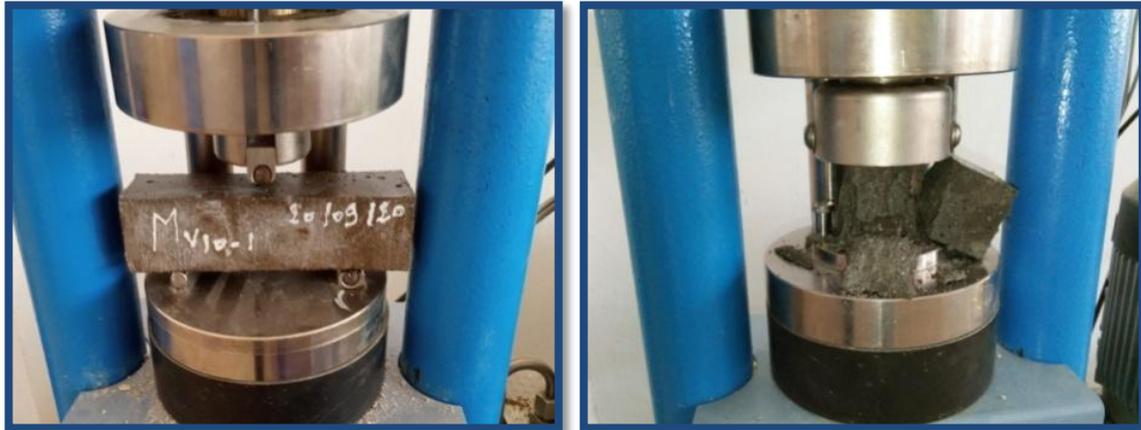
Figure 5. 10- Essai de détermination du temps de prise (a), Aiguille pour la détermination du temps de début de prise (b), Aiguille pour la détermination du temps de la fin de prise (c).

Le temps de fin de prise c'est de renverser les mêmes moules en caoutchouc déjà utilisés dans l'essai de temps de début de prise et de changer l'aiguille spécialisée pour l'essai (Figure 5.10-c) jusqu'à assurer que l'aiguille ne pénètre pour la première fois qu'à 0.5 mm ou l'annulaire de l'aiguille cesse de laisser la trace sur la pâte, et le temps de fin de prise à prendre en considération c'est le temps à compter du premier contact entre l'eau et le ciment.

V.4.2. Essais a l'état durci

V.4.2.1. La résistance à la compression

Le jour de l'essai de mesure des résistances à la compression des mortiers les éprouvettes prismatiques 40×40×160 mm ont été rompues en deux par le dispositif de flexion de la presse hydraulique CONTROLAB (Figure 5.11-a).



(a)

(b)

Figure 5. 11- Essais mécaniques : Résistance à la traction par flexion (a), Résistance à la compression (b).

Les deux demi-prismes obtenus sont utilisés pour la mesure de la résistance à la compression appliquée par la même presse hydraulique utilisée dans l'essai qui se précède mais avec un dispositif spécial pour la compression simple celui montré dans la Figure 5.11-b, les résistances à la compression sont calculées à l'aide de la Formule 1, avec $b = 40$ mm (NF EN 196-1).

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (1)$$

Note :

Rc : la résistance à la compression, en newtons par millimètre carré.

Fc : la charge maximale à la rupture, en newtons.

Les résultats obtenus de résistance à la compression à prendre en considération sont la moyenne de trois valeurs avec une tolérance de 10%, les échéanciers de suivi des essais mécaniques sont: 3, 7, 14, 28, 56, 90 et 180 jours.

V.4.2.2. La Masse volumique apparente

La masse volumique apparente des mortiers a été calculée à l'aide de la Formule 2, l'échéancier de mesure des densités apparentes est : 3, 7, 14, 28,56, 90 et 180 jours.

$$\rho = \frac{M}{V} \times \frac{1}{\rho_{\text{Eau}}} \quad (2)$$

Note :

M : est la masse de l'échantillon à l'état saturé.

V : est le volume de l'échantillon.

ρ_{Eau} : est le poids volumique de l'eau.

La masse des éprouvettes à l'état saturé (M) a été déterminée après avoir été retirées de l'eau, essuyées par un morceau de tissu afin d'éliminer l'excès d'eau, et pesées à l'air libre pour obtenir la masse de l'échantillon à l'état saturé (M) selon NF EN 12390-7.

La détermination du volume (V) des éprouvettes a été élaborée par la mesure des masses des échantillons sous l'eau (Mw) (Figure 5.12) avec un étrier de mesure de masse sous l'eau de masse (Met) selon la normalisation NF EN 12390-7, et la valeur de volume (V) à prendre en considération à l'aide de la Formule 3.

$$V = \frac{M - [(Met - Mw) - Met]}{\rho_{\text{water}}} \quad (3)$$

Note : L'unité de (V) est en cm^3 , (M, Md, Mw et Met) en gramme (g) et (ρ_{Eau}) en g/cm^3 .

V.4.2.3. La perte de masse des mortiers

La perte de masse (P.M) est calculée selon la Formule 4.

$$P.M = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (4)$$

Note : M1 et M2 les masses du même échantillon avant et après immersion.

Mêmes les pertes de volumes et les chutes des densités sont calculées de la même façon que celle de la perte de masse (Formule 4).



Figure 5. 12- Mesure de la masse des éprouvettes sous l'eau (Pesée hydrostatique).

V.4.2.4. Absorption d'eau après immersion

L'absorption d'eau après immersion des mortiers (Abs), mesurée par des éprouvettes prismatiques 40×40×160 mm à deux âges 28 jours et 180 jours.

La valeur d'absorption d'eau après immersion à prendre en considération est déterminée par la Formule 5 (ASTM, C642-13. 2013, Sebal, R. 2021, Liu, Y. 2022).

$$\text{Abs} = \frac{M - M_d}{M_d} \times 100 \quad (5)$$

La masse des éprouvettes à l'état saturé (M) a été déterminée après avoir été retirées de l'eau, essuyées par un morceau de tissu afin d'éliminer l'excès d'eau, et pesées à l'air libre pour obtenir la masse de l'échantillon à l'état saturé (M) selon NF EN 12390-7.

Pour la masse des éprouvettes à l'état sec (Md) les éprouvettes ont été mises à l'étuve 105°C afin de suivre la variation de la masse chaque 24 heures avec une erreur de 0.2% entre deux pesées successives (Md).

V.4.3. Essai de durabilité des mortiers

V.4.3.1. Attaque acide sur les mortiers

Les attaques acides sont très néfastes sur les bétons, elles peuvent exister dans la nature (pluies acides) ou dans les sites industriels (Chandra, S. 1988).

Pour cela l'amélioration de la résistance des bétons vis-à-vis de ce type d'attaque est devenue un critère technique nécessaire lors des constructions dans des sites pareils (Chang, Z.T. 2005)

Concernant l'essai d'attaque de l'acide chlorhydrique sur les mortiers objet de notre étude expérimentale, les échantillons utilisés sont des éprouvettes de mortier de forme cubique 50 mm fabriquées selon la même procédure décrite par le Chapitre VI-3.



Figure 5.13- Préparation des solutions d'acide chlorhydrique avec des concentrations 2% et 5%.

Les échantillons ont été mis dans une cure en eau saturée en chaux durant une période de maturation de 90 jours.

Après l'achèvement de cette période, elles sont retirées des bassins 24 heures avant l'exposition à l'acide et laissées à l'air libre.



Figure 5. 14- Immersion des éprouvettes dans la solution acide HCl avec concentration 5%.

Les solutions d'acide chlorhydrique avec concentration de 5 % a été préparé avec des quantités suffisantes pour l'essai (Figure 5.13).

Ensuite les éprouvettes sont immergées dans les solutions d'acide chlorhydrique (Figure 5.14) pendant 15 semaines (105 jours) (ASTM, C642-13. 2013, Senhadji. Y, 2014).

Un suivi de perte de masse, perte de volume, variation de densité selon les méthodes décrites dans le présent chapitre a été effectué chaque semaine.

Après chaque suivi hebdomadaire les solutions des acides ont été renouvelées.

V.4.3.2. Attaque interne des sulfates sur les mortiers

L'élaboration d'un suivi précis de l'expansion des dix mortiers exposés à une attaque interne des sulfates a eu lieu.

Deux barres avec les dimensions 25×25×285 mm de chaque type de mortier ont été fabriqués selon la méthode décrite par chapitre VI-3 (Figure 5.7-b) conformément à la normalisation ASTM, C490.

Une barre de 25×25×285 mm de chaque type des dix mortiers défini par le Tableau 5.1 ont été confectionnées et comparées par des mortiers contenant 7% de remplacement d'un

taux massique de ciment avec les sulfates de sodium (Na_2SO_4) selon la normalisation ASTM, C452-15.

Le malaxage et la confection dans des moules prismatiques $25 \times 25 \times 285$ mm (ASTM, C452-15) a eu lieu selon la même procédure décrite précédemment Chapitre VI-3 conformément à la normalisation NF EN 196-1.

Les éprouvettes ont été ensuite protégées par film plastique et après 24 heures (Figure 5.7-b) mises en cure en eau saturée en chaux.

Les éprouvettes $25 \times 25 \times 285$ mm ont été équipés par des plots normalisés spécialement pour les adapter avec le dispositif de mesure vertical par comparateur normalisé $1 \mu\text{m}$ près (Figure 5.15-a) ASTM, C490.

Le jour de l'essai de mesure de la longueur de l'échantillon les éprouvettes ont été retirées de l'eau essuyées par une éponge afin d'éliminer l'excès en eau, ensuite prendre les mesures à l'aide d'un comparateur équipé d'un dispositif vertical pour mesure les longueurs d'une façon verticale (Figure 5.15- b).



(a)



(b)

Figure 5. 15- Suivi des expansions des barres $25 \times 25 \times 285$ mm: Barres $25 \times 25 \times 285$ mm équipées des plots de mesure (a) Rétractomètre (b) .

Avant toute mesure de longueur des barres de mortier, le moyen de mesure a été étalonné par une longueur normalisée, ensuite de procéder à la mesure de la longueur de

l'échantillon par faire retourner l'échantillon et de prendre en considération la valeur minimale affichée sur le comparateur.

Les valeurs à prendre en considération dans le calcul sont la variation des longueurs « P % » dont ils sont calculés selon la Formule 7 (Chen, W. 2020).

$$P\% = \frac{L_t - L_0}{L} \times 100 \quad (7)$$

Note :

L_t = La longueur de l'échantillon à l'âge 'X', en millimètres.

L₀ = La lecture du comparateur de l'échantillon à l'âge 'X', en millimètres.

L = 250 mm, la longueur en dehors des plots de mesures.

V.4.3.3. Résistance des mortiers vis-à-vis les hautes températures

Les forêts sont trop exposées aux incendies pouvant durer plusieurs jours, ce qui met en risque toute vie existant aux endroits de ces incendies (BELGHIT, A. 2022).

En mois d'août 2021, l'Algérie a connu 41 incendies répartis sur 9 wilayas a eu lieu pendant plusieurs jours dont 1700 habitations ont été touchés par ces incendies ce qui a nécessité après cette catastrophe une expertise de ces constructions par les services techniques des constructions pour vérifier la possibilité de les remettre en service une autrefois (A. P. S. 16/08/2021 et 01/09/2021).

Cette situation nous oblige à réfléchir dans le futur de concevoir les bâtiments dans les endroits forestiers d'une façon à résister aux hautes températures dans des événements pareils.

Pendant les incendies les températures exposées sur les bétons peuvent atteindre jusqu'à 1000°C (Saridemir, M, 2022).

Plusieurs méthodes expérimentales ont été suivies par les chercheurs pour évaluer la résistance des bétons et mortiers vis-à-vis des hautes températures.



Figure 5. 16- Essai de résistance des mortiers aux hautes températures : Four Nobertherm (a), Mise en place des demi- éprouvettes prismatiques 40×40×80 mm dans le four (b), Essai de compression sur les demi éprouvettes 40×40×80 mm.

L'essai d'évaluation du comportement des mortiers soumis à des hautes températures a été élaboré sur des demi-éprouvettes prismatiques 40×40×80 mm, obtenus par rompre les éprouvettes 40×40×160 mm en deux parties par une scie circulaire après l'âge de 180 jours.

Les éprouvettes ont été mises en étuve jusqu'à la stabilisation de leurs masses, ensuite chacune des trois séries d'éprouvettes a été exposée à une température (Figures 5.16-a et 16-b) à savoir 400°C, 600°C et 800°C (Sasui, S. 2022, Zahedi, F. 2022, Ahsan, M. H. 2022, Vejmelková, E. 2018) durant 2 heures (Sasui, S. 2022).

L'évaluation des éprouvettes exposées aux hautes températures a été faite par l'essai de résistance à la compression (Figure 5.16-c).

V.4.3.4. Microstructure des mortiers

Afin d'enrichir les investigations sur les dix mortiers étudiées et de développer les débats sur les interprétations des résultats obtenus par les essais effectués, des vues sur la microstructure des mortiers ont été élaborés par microscope à balayage « MEB » Quattro (Figure 5.17).



Figure 5. 17- Microscope à balayage Quattro (Fiche technique de l'appareil).

Le microscope utilisé est de marque Quattro pour la nano caractérisation de plusieurs types de matériaux à savoir les métaux, les céramiques, minéraux, plastiques... Etc avec espace des paramètres du faisceau d'électrons défini par les caractéristiques techniques suivantes:

- Plage de courant du faisceau : 1 pA à 200 nA.
- Plage de tension d'accélération : 200 V à 30 kV.

- Plage d'énergie d'atterrissage : 20 eV – 30 keV avec faisceau en option décélération
- Agrandissement : 6 à 2500000×.

Le principe de la microscopie électronique à balayage (MEB) consiste à déplacer un faisceau d'électrons de haute énergie et très focalisé (environ 50 nm de diamètre) suivant une série de lignes parallèles sur la surface de l'échantillon à analyser. L'interaction du faisceau d'électrons avec la surface induit différents phénomènes (Taieb, F. 2018).

L'objectif principal des vues microscopiques élaborées sur les dix mortiers est de visualiser la microstructure des mortiers, la porosité et la densité ainsi d'effectuer des comparaisons entre les mortiers étudiés d'une façon à valider les interprétations des résultats obtenus dans le programme expérimental.

V.4.3.5. Conductivité thermique des mortiers à long terme

En addition aux critères de caractérisation des nouveaux matériaux pour utilisation cimentaire telle que le comportement à l'état frais, comportement mécanique et essais de durabilité. Le confort thermique des habitants est aussi une des exigences à prendre en considération lors de la conception des constructions et même lors du choix des matériaux utilisés (Bouckaert, S. 2021, Fabiani, C. 2018, Newman, J. 2003).

La conductivité thermique des matériaux constituant l'enveloppe extérieure des bâtiments influe directement la quantité d'énergie consommée par les habitants (Fabiani, C. 2018, Demirboğa, R. 2003).

Le mortier à base de ciment portland est largement utilisé pour la constitution de l'enveloppe des bâtiments ce qui le rend un facteur influant le confort thermique de ces derniers.

La procédure expérimentale de mesure de la conductivité thermique des dix mortiers à long terme a été conduite sur les éprouvettes cubiques 50 mm (Hamadache, M. 2018), confectionnées et mises en cure pendant 180 jours (6 mois) à trois états de saturations: saturé, séché à l'air libre et séché complètement en étuve.

Pour la série des échantillons mesurés à l'état saturé, les éprouvettes cubiques 50 mm ont été confectionnées et mises en cure dans l'eau toute la durée de cure (180 jours), le jour de mesure de la conductivité thermique les cubes de mortier ont été retirés des bassins essuyés par une éponge jusqu'à l'élimination de l'excès d'eau.



Figure 5. 18- Conductivimetre Isomet 2104.

La deuxième série des éprouvettes ont été retirés des bassins de cure et laissés à l'air libre jusqu'à la stabilisation de leurs masses avec une tolérance de 0.2% de variation de masse après 24 heures.

La troisième série a été retiré de la cure après 180 jours ensuite les éprouvettes ont été passés à l'étuve jusqu'à l'élimination totale de l'eau avec une tolérance de 0.1%.

La conductivité thermique a été déterminée par un appareillage spécialisé ISOMET 2104 (Figure 5.18) (ISO8302-91).L'appareillage utilisé est équipé d'une sonde plane et circulaire d'un diamètre de 40 mm assurant l'émission d'une impulsion de chaleur électrique (Gomes, M. G. 2018).La mesure de la réponse de la température électrique des flux émis par la source est assurée par la source (Gomes, M. G. 2018. Hamadache, M. 2018).

V. 5. Conclusion

Le programme expérimental dont les méthodes de déroulement des essais décrits en détail dans le présent chapitre ont été choisis d'une façon à atteindre les objectifs en fonction des moyens matériels disponibles et les méthodes de détermination selon les textes normatifs en vigueur à savoir : le comportement à l'état frais des pâtes et des mortiers (consistance normalisée, maniabilité, temps de prise des ciments), à l'état durci (compression simple, densités apparentes, absorption d'eau après immersion), des essais de durabilité des mortiers (attaque de l'acide HCl, attaque interne des sulfates, résistance aux hautes températures, conductivité thermique) avec des divers moyens de suivi du comportement des mortiers (compression simple, perte de masse, perte de volume, chute de densités, variation de longueur, Vus microscopiques) et des essais de mesure de la conductivité thermique des mortiers.

Chapitre VI- Résultats et discussions

Chapitre VI : Résultats et discussions

VI. 1. *Introduction*

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus au cours de l'expérimentation développée selon les étapes et méthodes décrites précédemment dans le chapitre V : Procédures et méthodes expérimentales. Des explications et des interprétations des résultats obtenus ont été discutées afin d'enrichir le travail. Ensuite, les résultats obtenus ont été comparés par ceux mentionnés dans la littérature, les limitations des méthodes expérimentales utilisées, les perspectives et les ajouts nécessaires en la matière.

Les résultats sont présentés en trois parties principales à savoir: la caractérisation des mortiers à l'état frais, les résultats à l'état durci et les résultats des essais de durabilité et de conductivité thermique.

VI. 2. *La caractérisation des mortiers à l'état frais*

VI.2.1. La consistance normalisée

La Figure 6.1 présente les résultats d'essai de consistance normalisée sur les dix pâtes décrites dans le Tableau 5.1- Chapitre V. Il a été constaté que les additions partiellement substituables au ciment (APSC) utilisées à savoir la vase calcinée, la pouzzolane naturelle et la combinaison entre ces deux ajouts cimentaires augmentent la demande en eau proportionnellement avec le taux de remplacement pour atteindre la consistance normalisée par rapport au ciment Portland.

La vase calcinée consomme plus d'eau par rapport à la pouzzolane naturelle et même à la combinaison entre les deux substituts utilisés. La combinaison entre la vase calcinée et la

pouzzolane naturelle réduit légèrement la consommation d'eau par rapport à la vase calcinée seule.

Ces résultats sont liés principalement aux non-uniformités des grains, à la finesse de ces grains et à la faible densité des additions utilisés par rapport au ciment portland (Newman, J. 2003).

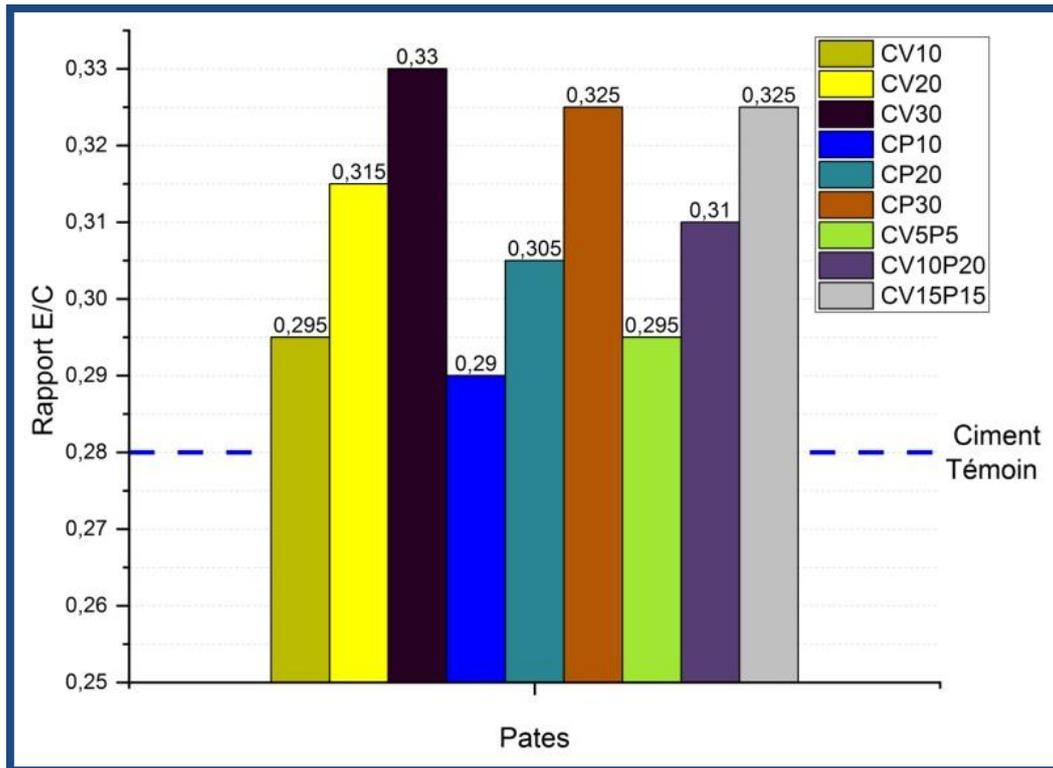


Figure 6. 1- La consistance normalisée des mortiers.

Il faut également souligner que la substitution partielle du ciment est massive et que les densités des APSC utilisés sont plus faibles par rapport à celle du ciment ce qui génère une augmentation du volume de la pâte et exige une quantité additionnelle d'eau pour atteindre la consistance normalisée.

Les auteurs Semcha, A, Belaribi, O, Safer, O, Belguessmia, K, et Taieb, F aussi notent que la vase calcinée et la pouzzolane naturelle comme substituant au ciment réduisent la maniabilité des mortiers.

La légère diminution de la consommation d'eau due à la combinaison de la vase calcinée et la pouzzolane naturelle est bénéfique pour développer une formulation

économique basée sur deux matériaux et d'introduire des adjuvants pour éviter le problème de la consommation élevée d'eau.

VI.2.2. Essais de temps de prise du ciment

Les résultats d'essai de temps de prise des dix ciments modifiés sont montrés dans la Figure 6.2. Le temps de prise de la pâte diminue proportionnellement avec le taux de remplacement du ciment par le vase calciné et la pouzzolane naturelle, en particulier les pâtes contenant la vase calcinée enregistrent les valeurs les plus importantes.

Les pâtes contenant la pouzzolane naturelle ont des valeurs plus faibles que celles de la vase calcinée, et un comportement similaire entre la pouzzolane naturelle et les combinaisons (Vase calcinée et Pouzzolane naturelle). En général, l'utilisation de ces deux composants pour remplacer partiellement le ciment réduit légèrement le temps de prise du ciment.

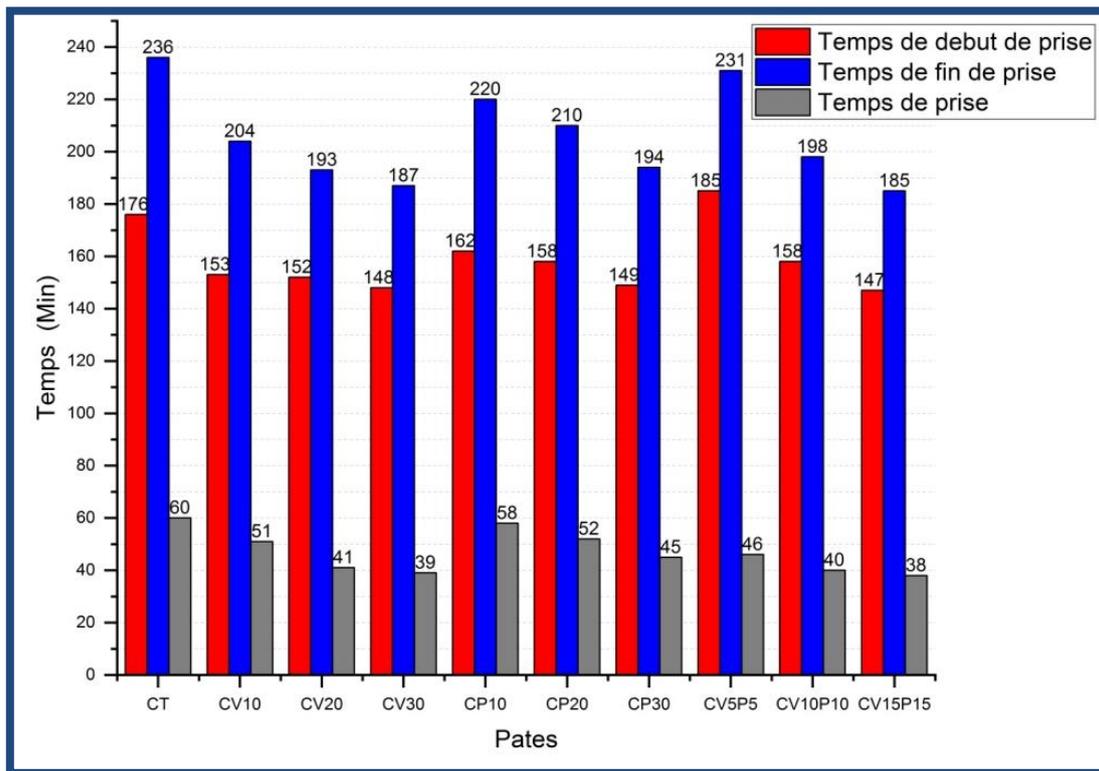


Figure 6. 2- Résultats de temps de prise des ciments.

Les résultats présentés dans la Figure 6.2 et ceux cités dans la littérature élaborée par Belaribi, O et Safer, O sont similaires.

Les nouvelles combinaisons présentent le même comportement par rapport aux additions seules ce qui est bénéfique pour les travaux de décoffrage rapide ou en temps froid.

VI. 3. La caractérisation à l'état durci

VI.3.1. Résistance a la compression des mortiers

La Figure 6.3 montre les résultats relatifs à la résistance à la compression du mortier témoin et des neuf autres à base des ciments modifiés. Pour l'ordre de substitution du ciment par 10 % (Figure 6.4), les résultats sont proches par rapport au mortier témoin spécialement à long terme (de l'ordre de 60 MPa) avec un avantage pour la combinaison MV5P5 par rapport aux mortiers MV10 et MP10. En revanche, à court terme, il y avait un avantage pour le MV10 et le MV5P5 et un retard pour le MP10.

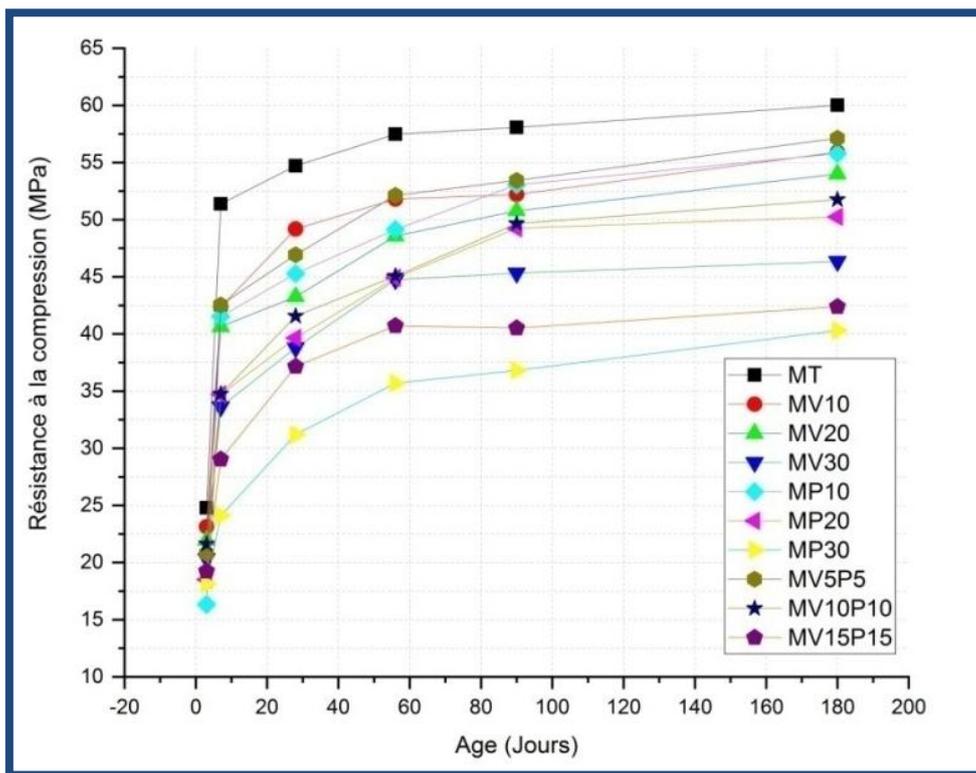


Figure 6. 3- Résistance des dix mortiers à la compression.

Pour le taux de remplacement de 20% (Figure 6.5), il convient de souligner un avantage pour le MV20 et le MV10P10 à long terme, et les valeurs les plus basses sont enregistrées pour le mortier MV20 particulièrement à court terme.

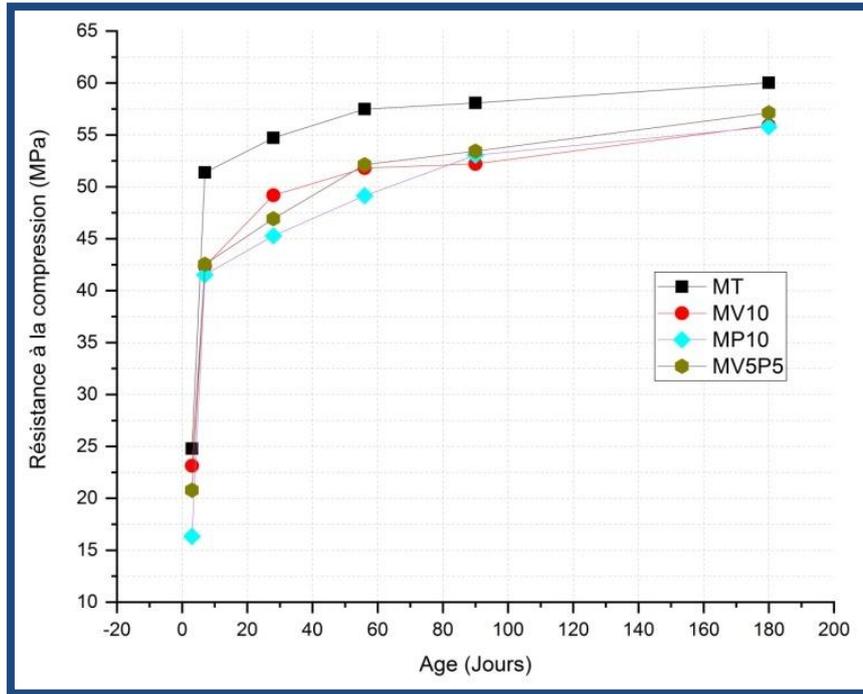


Figure 6. 4- Résistances à la compression des mortiers avec des taux de remplacement du ciment par 10% des APSC.

Les meilleurs résultats de résistance à la compression enregistrés pour le taux de substitution de 30% sont ceux des mortiers MV30 (46 MPa), pour la combinaison MV15P15 (42.5 MPa). Les plus faibles résultats sont ceux du mortier MP30.

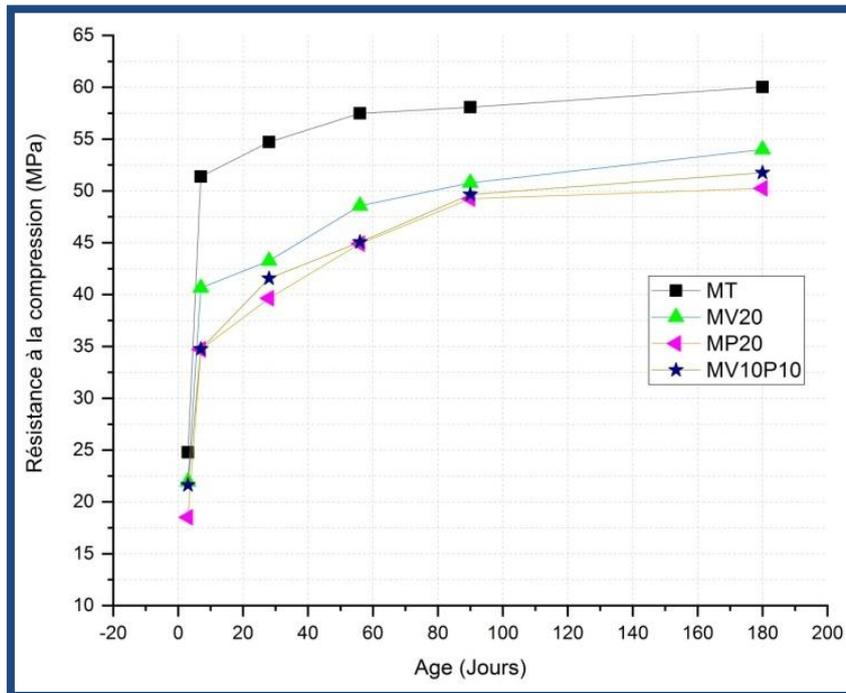


Figure 6. 5- Résistances à la compression des mortiers avec des taux de remplacement du ciment par 20% des APSC.

Les résultats obtenus indiquent que l'activité pouzzolanique de la vase calcinée est supérieure à celle de la pouzzolane naturelle, ce qui est en accord avec les travaux cités dans la littérature à savoir Safer, O. 2018, Taieb, F. 2018.

Les bonnes résistances à la compression obtenus par les combinaisons de la vase calcinée et la pouzzolane naturelle peuvent être reliées à l'augmentation des probabilités de la consommation de la chaux libre et l'hydroxyde de calcium par la silice réactive contenant dans les deux types des APSC avec des degrés de finesses variables, Ce qui a été traduit par l'augmentation des résistances mécaniques par rapport aux mortiers à base de la vase calcinée ou la pouzzolane utilisée seule. Ces résultats valident la faisabilité de la combinaison entre la vase calcinée et la pouzzolane naturelle comme substituant au ciment. En particulier, les mortiers MV5P5 et MV10P10 à jeune âge ce qui est bénéfique pour le décoffrage rapide et qui va revenir en gains financiers. Les résultats obtenus nous incitent à concevoir des formulations basées sur cette combinaison pour produire des mortiers et des bétons à haute performance.

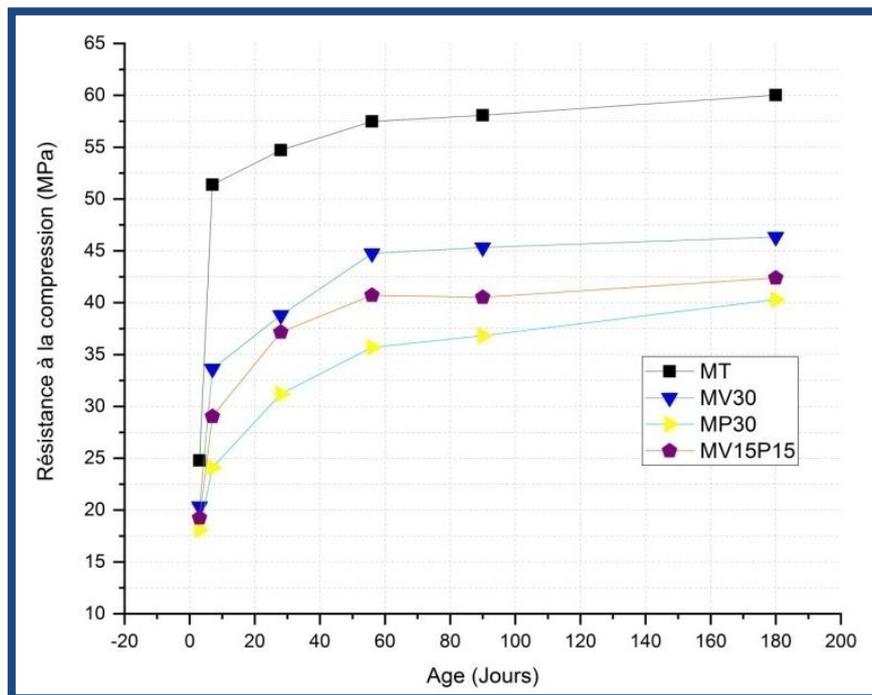


Figure 6.6- Résistances à la compression des mortiers avec des taux de remplacement du ciment par 30% des APSC.

Les faibles résultats obtenus pour le taux de remplacement de 30% (Figure 6.6) par rapport aux autres mortiers (Figures 6.4 et 6.5) peuvent être reliés au rapport E/C élevé et

l'effet de dilution. Néanmoins, ces formulations peuvent être proposées pour des domaines d'utilisation de crépissage des murs extérieurs ou pour les travaux de maçonnerie.

VI.3.2. Absorption d'eau après immersion

La Figure 6.7 montre les résultats d'essai d'absorption d'eau après immersion des dix mortiers à deux échéances différentes, 28 jours et 180 jours. On remarque que les mortiers à base des ciments modifiés enregistrent des valeurs d'absorption élevées par rapport au mortier témoin à l'âge de 28 jours proportionnellement avec les taux de remplacement.

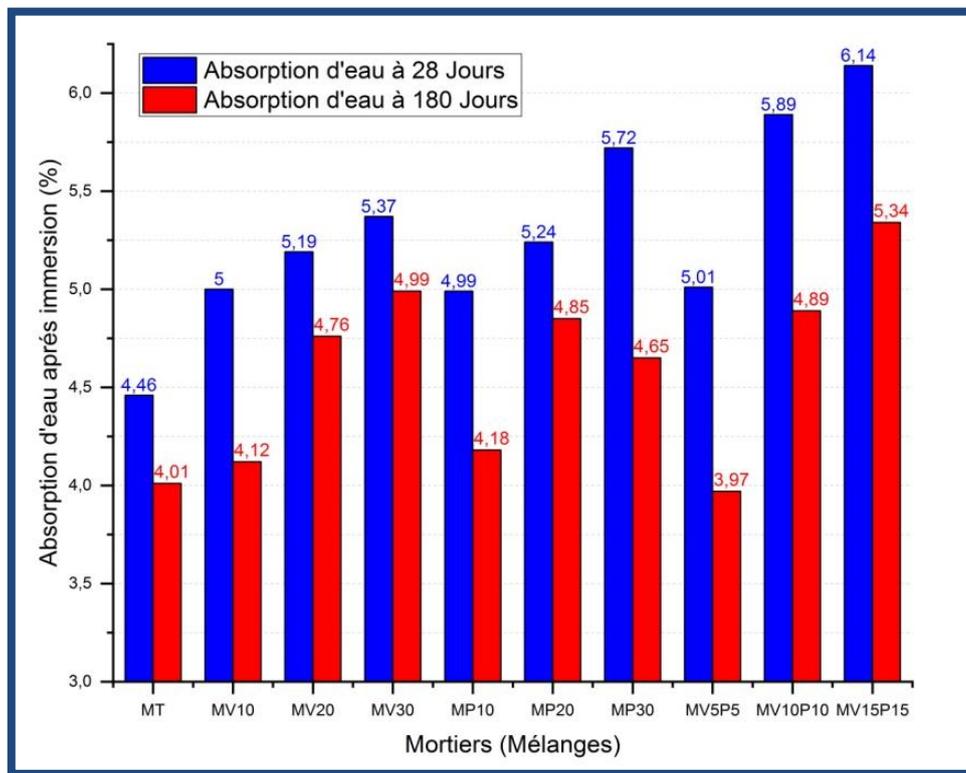


Figure 6. 7- Absorption d'eau après immersion.

Une forte consommation d'eau pour les mortiers contenant des combinaisons ternaires à l'âge de 28 jours par rapport au mortier témoin, en second degré les mortiers à base de la pouzzolane naturelle, des valeurs d'absorption les plus basses par rapport aux autres mortiers enregistrés par ceux qui contiennent la vase calcinée seule. Des valeurs d'absorption d'eau égales entre les mortiers MV10 et MP10.

Les résultats obtenus à l'âge de 28 jours sont expliqués par le rapport E/L initialement élevé qui augmente de volume ainsi la porosité des mortiers en fonction des taux de remplacement.

Les valeurs d'absorption d'eau diminuent à l'âge de 180 jours, particulièrement pour les mortiers à base de ciment contenant des APSC. Ce comportement est lié principalement à la réaction pouzzolanique par la consommation de la chaux libre et la portlandite résultante de l'hydratation du ciment ce qui remplit les vides, diminue la porosité, augmente la densité et la résistance à la compression. Surtouts pour les mortiers MV5P5, MV10 et MP10 qui ont enregistré des valeurs similaires à celui du mortier témoin.

Pour les mortiers dont les ciments sont modifiés par des taux de remplacement de 30%, les valeurs d'absorption de l'eau sont plus importantes que les séries précitées en raison des ratios E/L élevés qui régénère une plus grande porosité qui facilite le transfert d'eau à l'intérieur des mortiers.

Ce test est simple et représente une bonne indication de la propriété de transfert de mortier, cela confirme les caractéristiques citées dans la bibliographie à savoir les particules fines de la vase calcinée augmentant la compacité de la structure et diminue la porosité des mortiers ce qui est bénéfique pour la durabilité des mortiers.

Cet essai n'a jamais eu lieu sur des mortiers ou des bétons à base de la vase calcinée en tant qu'APSC, et même des œuvres rares qui ont développé des essais d'absorption d'eau après immersion sur mortiers, Sebal, R. 2021 a travaillé sur l'absorption d'eau des mortiers contenant le caoutchouc pour le remplacement des agrégats, et ont obtenu des résultats d'absorption plus élevée que celles pour les mortiers du présent travail ce qui est relié à la porosité élevée des mortiers.

VI.3.3. La variation de la masse des mortiers

La Figure 6.8 présente les gains de masse des éprouvettes prismatiques 40×40×160 mm des dix mortiers (MT, MV10, MV20, MV30, MP10, MP20, MP30, MV5P5, MV10P10 et MV15P15) immergés dans une cure à eau saturée en chaux durant 180 jours.

Sous les conditions de cure décrites précédemment, la variation de la masse des mortiers augmente de 0,9% à 1,4% par ordre linéaire croissant pour toutes les éprouvettes tout au long de la période de 180 jours.

Le mortier témoin enregistre les valeurs les plus élevées parmi la dizaine de mortiers étudiés, une autre série de mortiers montre une hausse très proche de celle du mortier témoin (1,4%) à savoir les MV10P10, MP20, MV5P5 et MP10.

Les mortiers restants présentent les taux de croissance massique les plus faibles, avec des valeurs allant de 0,9 % à 1 %.

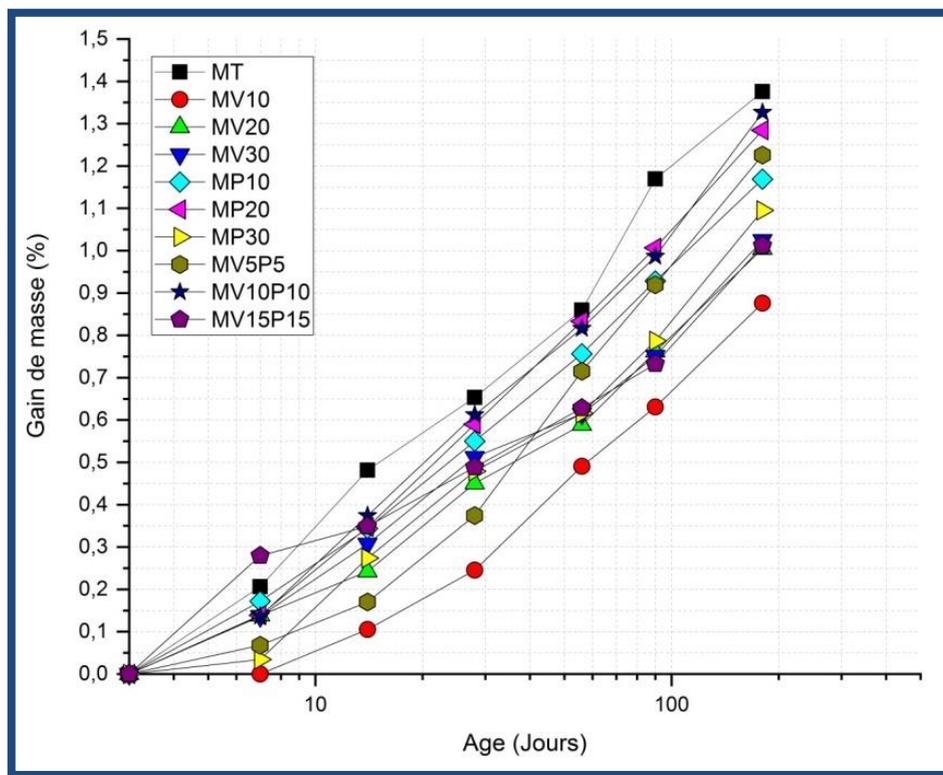


Figure 6. 8- Gain de masse des mortiers dans une cure normale.

À jeune âge, ces valeurs sont dues à la composition de chaque mortier et la densité de chaque composant dans les formulations des mortiers dont le témoin contenant 100% de ciment CEMI (avec une densité absolue de 3.14) supérieure aux densités des ajouts cimentaires utilisés (la vase calcinée et la pouzzolane naturelle).

Pendant le reste du temps, les valeurs sont liées au taux de formation de C-S-H qui se caractérise par une densité plus élevée contribuant à l'augmentation de la masse des mortiers.

VI.3.4. Variation du volume

La Figure 6.9 présente les résultats de la diminution en volume des échantillons des dix mortiers étudiés mesurés par la poussée d'Archimède suivant la méthode décrite au chapitre V 4.2.2.

D'après les résultats affichés sur la Figure 6.9 les mortiers peuvent être classés en trois séries, une série de mortiers ayant les plus grandes valeurs de réduction de volume parmi les mortiers étudiés de l'ordre de 4% à savoir le MV20, MV10 et MV5P5.

Une deuxième série de mortiers dont le volume moyen a diminué d'environ 2 % tel que le MV10P10, MP10 et MT. Et une troisième série qui a enregistré les valeurs de baisse de volume les plus faibles, y compris les MP20, MV15P15, MP30 et MV30.

Il est à noter que contrairement aux résultats obtenus par l'épreuve de variation de masse qui était linéaire et croissante, la variation du volume du mortier était complètement différente.

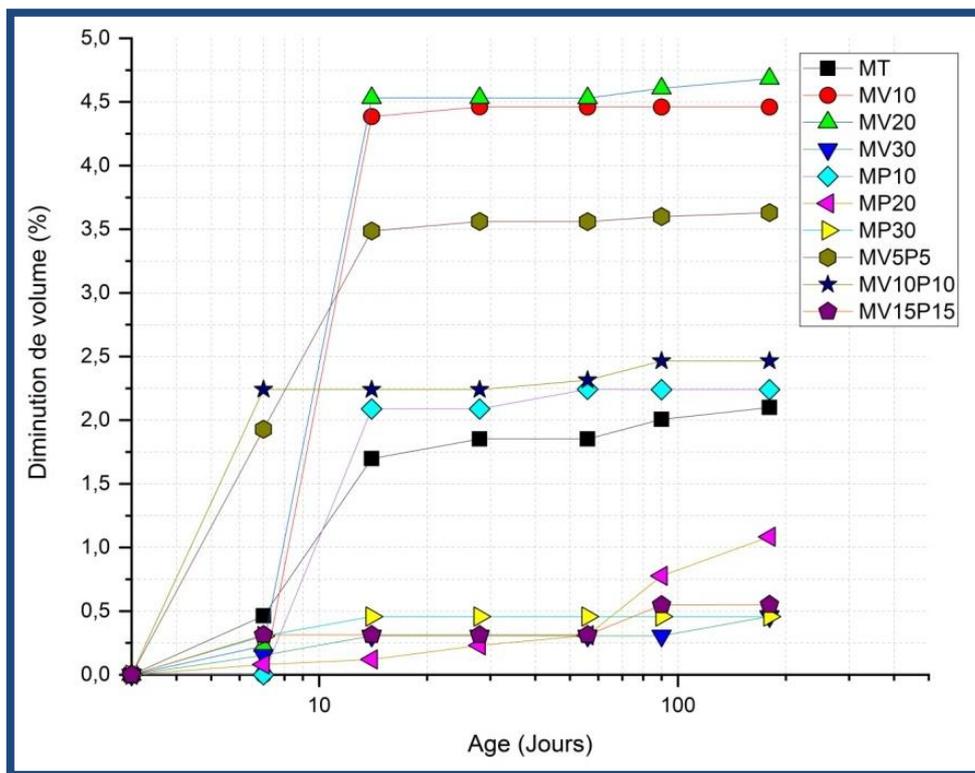


Figure 6. 9- Perte de volume des mortiers dans une cure normale.

Les principales causes de réduction de volume peuvent provenir de la dessiccation par évaporation d'eau ou par l'auto-dessiccation des mortiers au cours de l'hydratation du ciment, ce qui conduit à une réduction du volume de mortier.

Dans notre cas, les éprouvettes ont été protégées contre la dessiccation grâce à la protection par film plastique durant les 24 premières heures ensuite déposés dans les bassins d'eau saturés en chaux pendant 180 jours.

Les trois séries de mortiers représentent la réduction en volume, qui varie d'un mortier à l'autre, ces variations sont dues au retrait endogène lors de l'hydratation du ciment tel qu'indiqué à la Figure 6.9.

Les valeurs de réduction volumique significatives enregistrées par les mortiers MV20, MV10 et MV5P5 sont dus à une forte consommation interne d'eau par des réactions chimiques lors de l'hydratation du ciment et des réactions pouzzolaniques.

Ceci provoque une auto-dessiccation causant une diminution importante du volume pendant les premiers jours et avec le temps continue légèrement à diminuer au cours du temps avec un rythme faible dû aux réactions pouzzolaniques.

La deuxième série de mortiers MV10P10, MP10 ayant des taux de réduction de volume moyen et semblables à ceux du mortier témoin MT. Et vu ces trois mortiers (MT, MV10P10 et MP10) enregistrent des résistances mécaniques importantes, cela prouve que les rapports E/L sont bénéfiques et que les proportions entre le ciment et les additions substituables de ciment sont parfaites ce qui a résulté des faibles diminutions de volumes.

Pour la troisième série de mortiers, à savoir MP20, MV15P15, MP30 et MV30, il y a une faible baisse du volume pendant les premiers jours expliqués par le phénomène de dilution causé par le contenu élevé des additions substituables au ciment ce qui a réduit les réactions d'hydratation du ciment. Après 90 jours, il y a une faible augmentation des valeurs due aux réactions pouzzolaniques qui se poursuivent au cours du temps.

VI.3.5. Variation de la densité apparente

La Figure 6.10 illustre les résultats de gain de densités des dix mortiers objet du présent travail expérimental. Il convient de noter que les résultats obtenus indiquent que les

mortiers se comportent de la même manière que celle décrite dans les résultats des réductions de volume.

Les mortiers de la première série, à savoir les MV10, MV20 et MV5P5, enregistrent une baisse de volume élevée accompagnée par des hautes valeurs d'augmentation de densités avec des taux entre 4 à 5% pendant les 10 premiers jours continuant à augmenter et atteignant des valeurs entre 5 à 6% à 180 jours.

Ceci confirme les explications déjà notées par les réactions d'hydratation au cours des dix premiers jours produisant des C-S-H et contribuant à l'augmentation des valeurs de densités.

La deuxième série de mortiers notamment MT, MP10 et MV10P10 atteint des valeurs moyennes et croissantes entre 2.5% à 10 jours et 4% à l'âge de 180 jours, expliqué par les proportions bénéfiques entre le ciment et les additions partiellement substituables au ciment et un rapport E/L convenable.

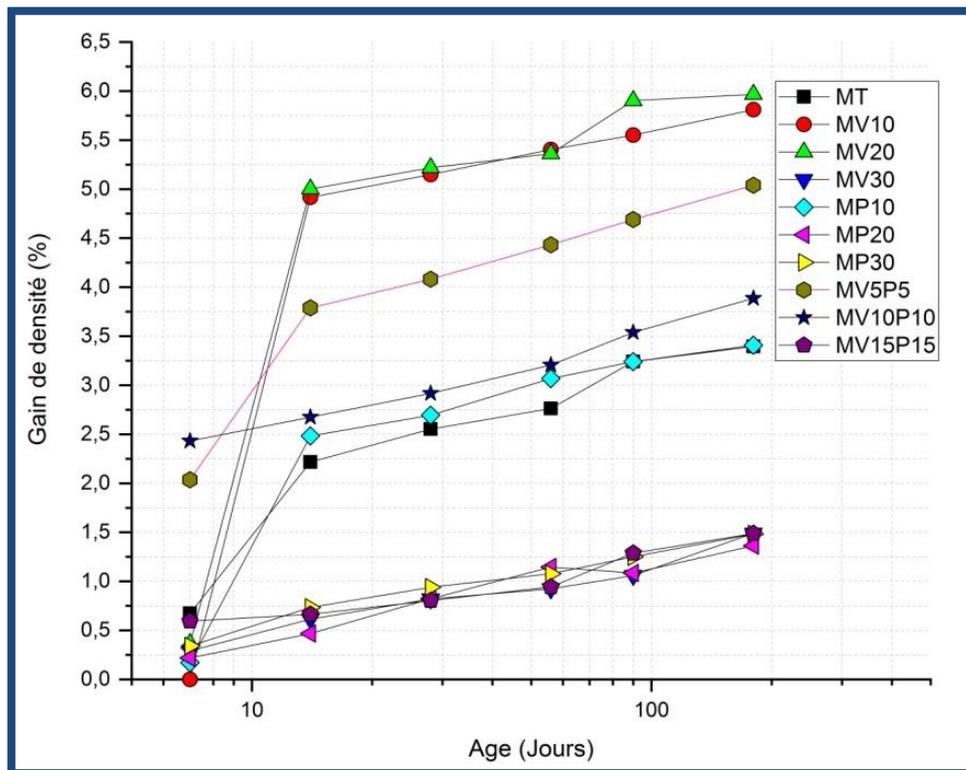


Figure 6. 10- Gain de densité dans une cure normale.

Finalement, la troisième série avec de faibles taux d'augmentation de densité surtout les premiers jours et qui atteint après 180 jours de cure une valeur de 1.5 %, ce qui est dû au phénomène de dilution.

VI. 4. Les résultats d'essais de durabilité et de conductivité thermique

VI.4.1. Essai d'attaque de l'acide chlorhydrique sur mortier

Les Figures 6.11, 6.12 et 6.14 montrent respectivement les résultats de perte de masse, perte de volume et chute de densités des dix mortiers après immersion pendant 15 semaines dans une solution d'acide chlorhydrique avec une concentration de 2%. Pendant les 5 premières semaines, il a été remarqué que les pertes de masse enregistrées sont faibles et identiques pour l'ensemble des mortiers, avoisinant les 4%.

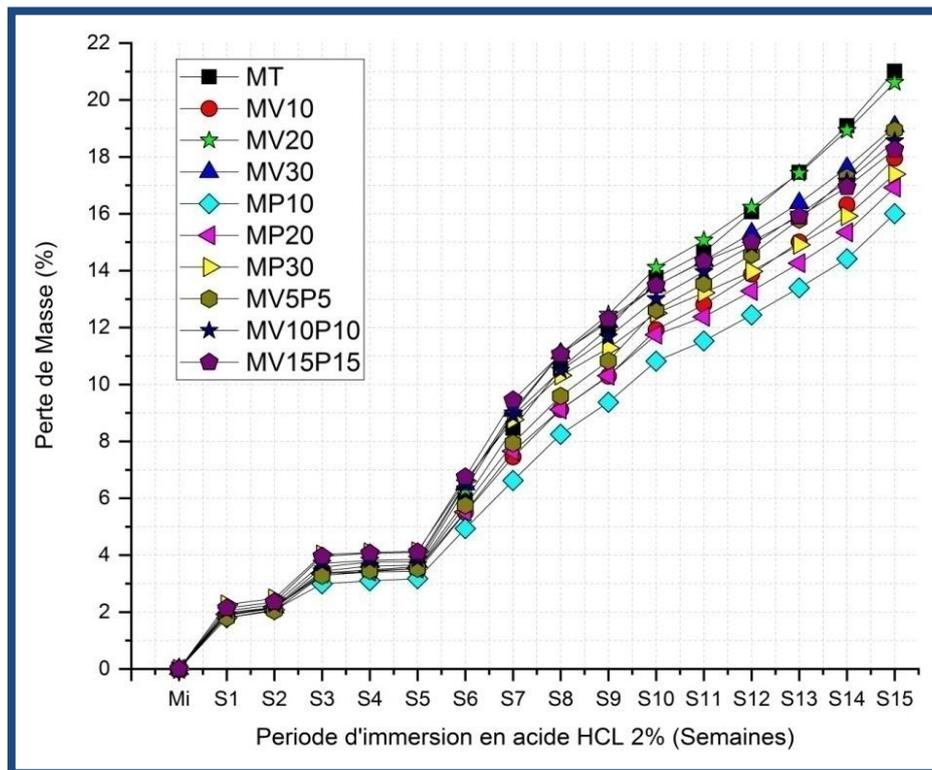


Figure 6. 11- Perte de masse des mortiers exposés à l'acide chlorhydrique 2%.

Après 5 semaines d'immersion, les pertes de masse augmentent avec une cadence plus importante. Les valeurs des pertes de masse finaux des mortiers MT, MV10, MV20, MV30, MP10, MP20, MP30, MV5P5, MV10P10 et MV15P15 après immersion dans l'acide

chlorhydrique avec une concentration de 2% durant 15 semaines sont respectivement comme suit : 21.01%, 17.96%, 20.61%, 19.07%, 16.00%, 16.92%, 17.39%, 18.94%, 18.56% et 18.26% (Figure 6.11).

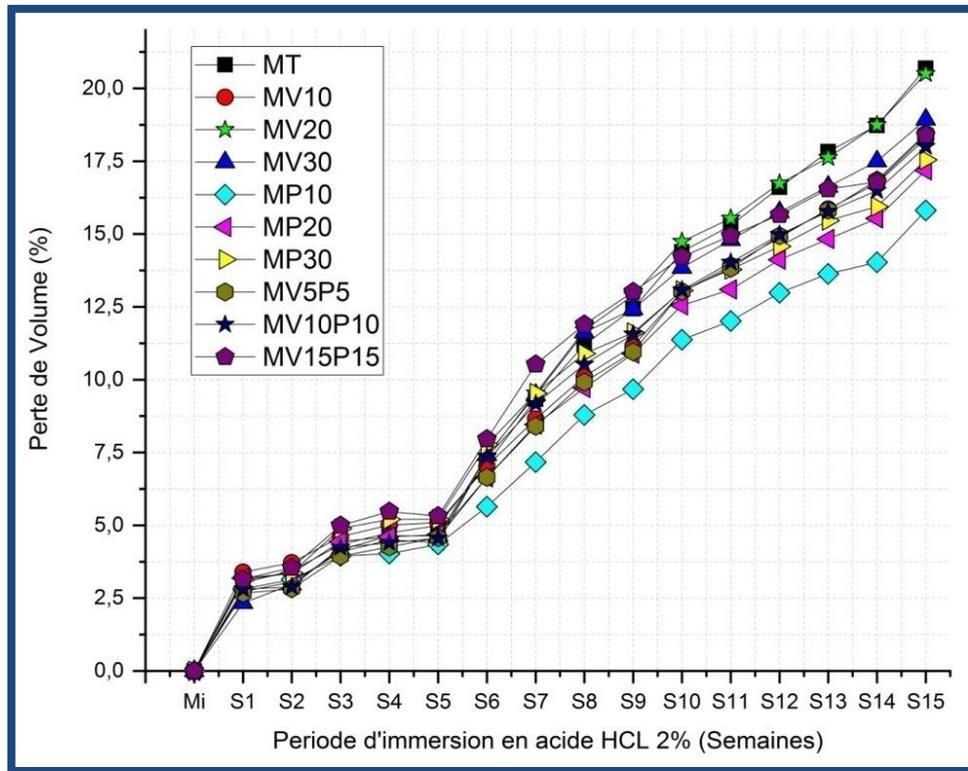


Figure 6.12- Diminution de volume des mortiers exposés à l'acide chlorhydrique 2%.

Il est à noter une résistance plus importante des mortiers contenant un taux de remplacement de 10% à savoir MV10, MP10 et MV5P5 ainsi que le MP20 par rapport aux autres mortiers avec un léger avantage pour les mortiers contenant la pouzzolane naturelle, mais en général les valeurs enregistrées du reste des mortiers testés sont proches.

D'une part, ces résultats sont expliqués par la bonne proportion entre le ciment CEMI utilisé avec 10 % de la vase calcinée et la pouzzolane naturelle seuls ou en combinaisons, Cela permet la consommation adéquate de produits d'hydratation du ciment tels que la chaux libre et l'hydroxyde de calcium sensible au contact de l'acide chlorhydrique.

D'autre part, à la diminution d'absorption d'eau constaté à long terme pour les mortiers MV10, MP10 et MV5P5 dans les essais précédents, ceci a favorisé ces mortiers de résister contre les attaques acides.

Comme montré dans la Figure 6.12, la perte de volume des mortiers a été équivalente à la variation de masse des mêmes mortiers.

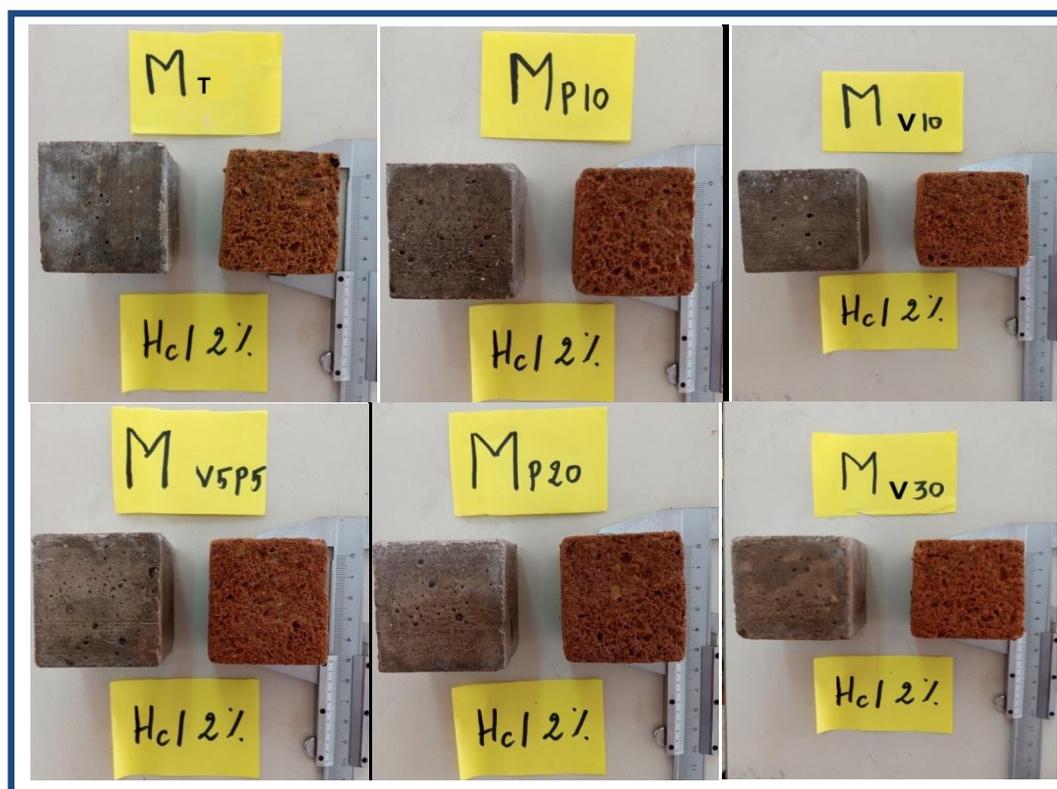


Figure 6. 13- Les mortiers M_T , M_{V10} , M_{P10} , M_{V5P5} , M_{P20} et M_{V30} après 15 semaines d'immersion en acide chlorhydrique 2% de concentration.

Pour les résultats de chute de densité présentés dans la Figure 6.14, après les 5 semaines d'attaque d'HCl avec 2% de concentration l'ensemble des mortiers commence à perdre leurs densités avec un meilleur comportement pour les mortiers M_{V5P5} , M_{V10P10} et M_{P10} par rapport aux autres mortiers.

La Figure 6.15 présente les résultats obtenus au cours de l'essai d'attaque au mortier par l'acide chlorhydrique à une concentration de 5 % pendant 180 jours. Les mortiers M_{V10} , M_{V20} , M_{P10} , M_{P20} , M_{V5P5} immergés dans l'acide chlorhydrique 5% durant les cinq premières semaines enregistrent de faibles valeurs de pertes de masse par rapport au mortier témoin.

Les mêmes mortiers restent plus résistants que le mortier de contrôle (M_T) après 10 semaines d'immersion. L'amélioration du comportement des mortiers M_{P30} , M_{V10P10} , et M_{V15P15} à cette échéance d'immersion (10 semaines) par rapport à M_T , à l'exception M_{V30} qui a enregistré une perte de masse supérieure au mortier de contrôle M_T . Après 15 semaines d'immersion dans la solution acide 5%, tous les mortiers contenant des APSC (Additions partiellement Substituables au ciment) à savoir la vase calcinée et la pouzzolane naturelle

seule ou en combinaisons résistent mieux que le mortier témoin (MT). Les meilleures valeurs de perte de masse sont obtenues avec les mortiers MP20, MP10, MV5P5, MV10, et MV15P15 sont comprises entre 33,29% et 40,40% contre une perte de masse de 58,01% pour le mortier témoin.

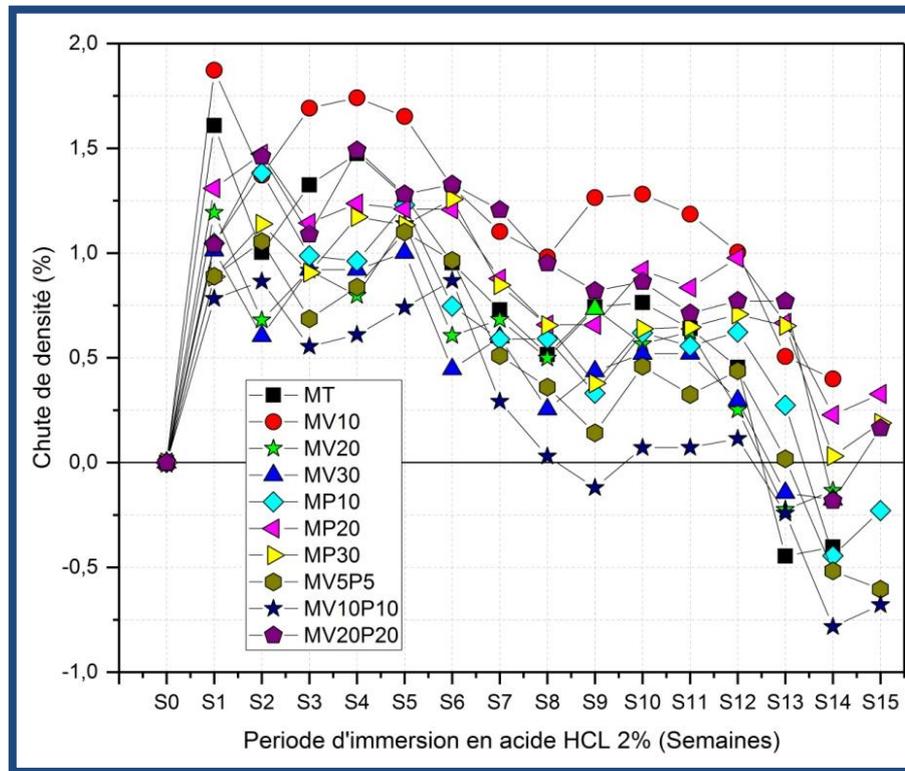


Figure 6. 14- Gain de densité des mortiers exposés à l'acide chlorhydrique 5%.

Ces résultats sont en relation avec la consommation de chaux libre et de portlandite après hydratation du ciment portland, responsables de la perte de masse des mortiers en raison de leur vulnérabilité en présence d'acide chlorhydrique conformément aux résultats obtenus par Chandra, S en 1988.

Pour les mortiers à base de ciments modifiés surtout MP20, MP10, MV5P5, MV10 et MV15P15, la chaux libre et le portlandite sont bien consommés par la silice réactive contenue dans la pouzzolane naturelle et bien davantage la vase calcinée augmentant la production des C-S-H, remplissant les pores et retardant l'effet de l'acide chlorhydrique (Hossain, M. M. 2016, Newman, J. 2003, Mohit, M. 2021).

Ces résultats confirment et complètent les travaux menés par Belaribi, O. 2018, qui a utilisé 20% de la vase calcinée comme substituant partiel au ciment pour stopper les attaques

acides HCl contre le béton. Cependant, d'autres taux de remplacement du ciment se sont avérés résistants à ce type d'attaque comparativement au MV20.

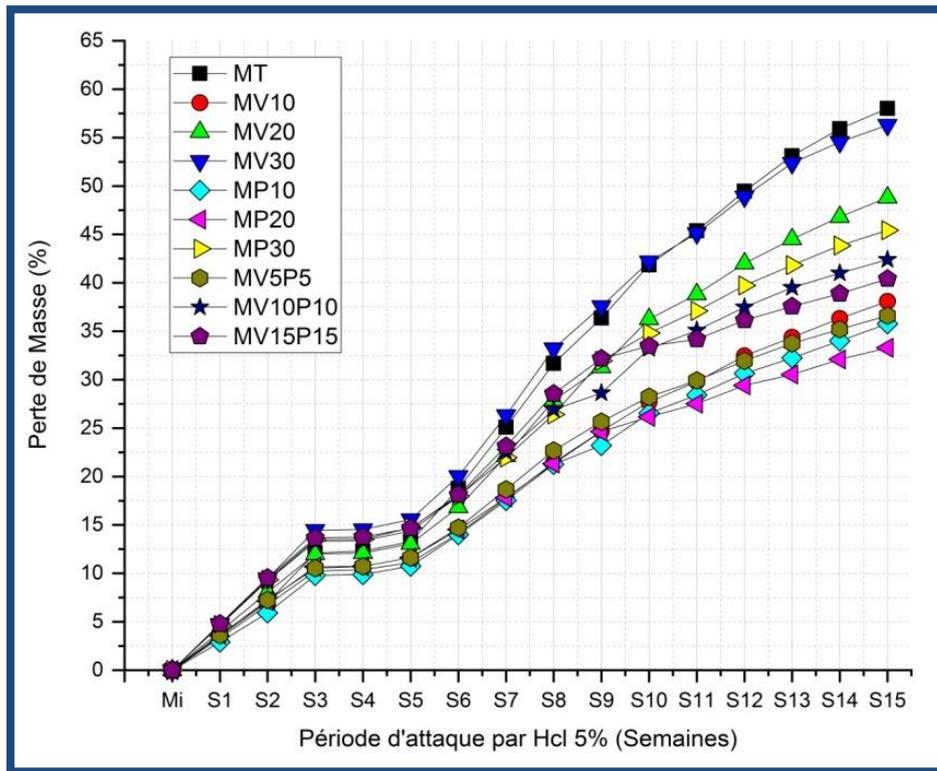


Figure 6.15- Perte de masse des mortiers exposés à l'acide chlorhydrique 5%.

Les résultats obtenus sont en concordance avec plusieurs résultats obtenus par les chercheurs cités dans la bibliographie, qui ont prouvé l'usage de la pouzzolane naturelle et des cendres volantes pour résister à l'acide chlorhydrique (Laoufi, I. 2019, Senhadji, Y. 2014, Ghrici, M. 2006, Siad, H. 2010, Kumar, R. 2021).

Il est à souligner que ces résultats peuvent aussi être reliés secondairement par la richesse des APSC utilisées à savoir la vase calcinée et la pouzzolane naturelle par des taux considérables en oxydes AL_2O_3 et Fe_2O_3 ce qui a un effet positif sur l'amélioration du comportement des ciments subissant une attaque à l'acide chlorhydrique (Kumar, R. 2021, De, C. 1992).

Il peut être reporté que le mortier MV15P15 résiste bien contre l'acide chlorhydrique mais vu sa faible résistance à la compression par rapport au mortier témoin, est relié à son haut E/L.

Pour éviter le problème de faible résistance du mortier MV15P15, il suffit de développer cette formulation par les adjuvants plastifiants ou super-plastifiants permettant la réduction de la quantité de l'eau pour une meilleure mise en place des particules.

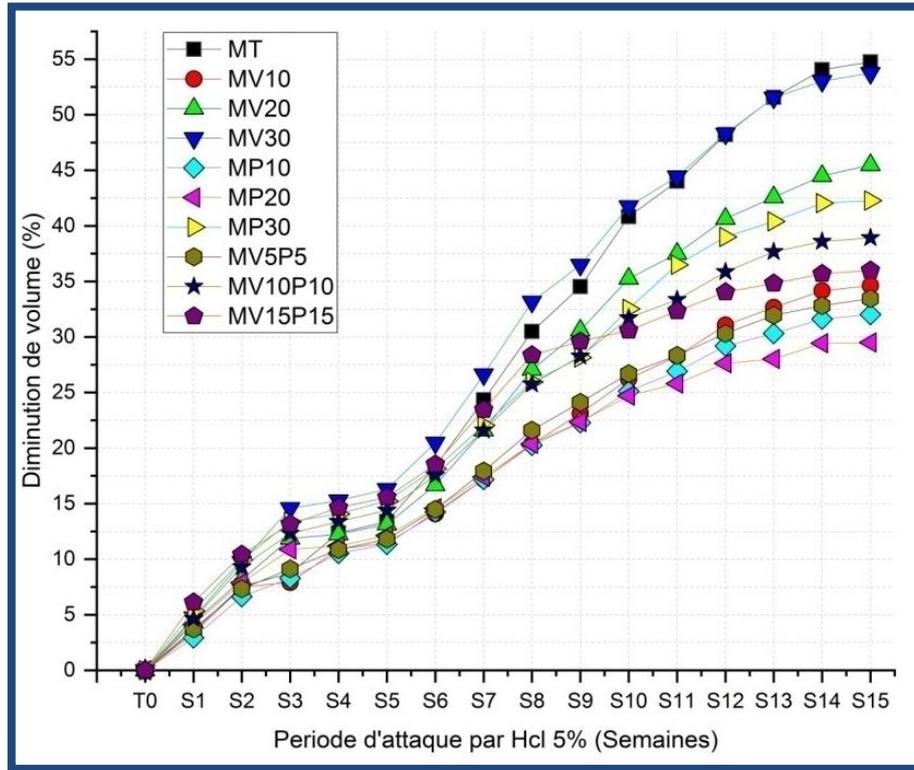


Figure 6. 16- Diminution de volume des mortiers exposés à l'acide chlorhydrique 5%.

La perte de volume des mortiers après 17 semaines d'immersion en acide HCl avec une concentration de 5% est illustrée par la Figure 6.16.

Il convient de noter que la variation de volume est similaire à la variation de masse de mortier, qui valide les résultats obtenus antérieurement.

La réduction de volume est principalement due à la réaction entre HCl la chaux libre et la portlandite résultant de l'hydratation du ciment produisant la solution chlorure de calcium CaCl_2 , ce qui est destructeur à la matrice de ciment et facilite la décomposition de C-S-H et C-A-H (Mohit, M, 2021).

Ces résultats s'expliquent en second lieu par les propriétés de transfert des mortiers qui facilitent l'infiltration d'acide à l'intérieur de la structure du mortier, pour les cas où l'absorption est faible, ce phénomène se fait lentement.

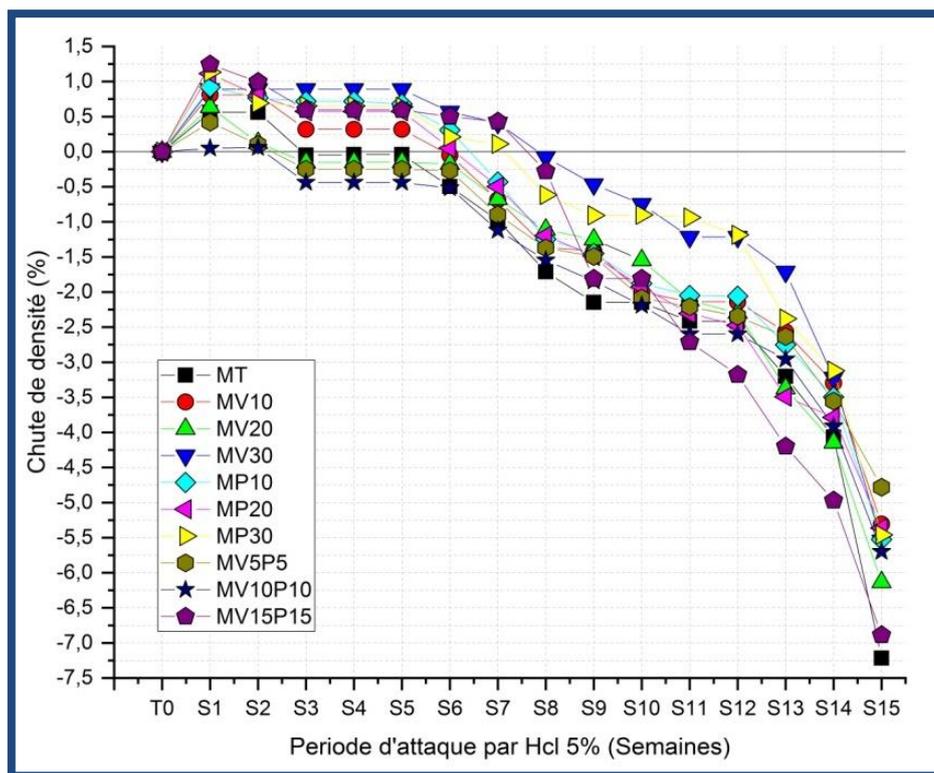


Figure 6. 17- Gain de densité des mortiers exposés à l'acide chlorhydrique 5%.

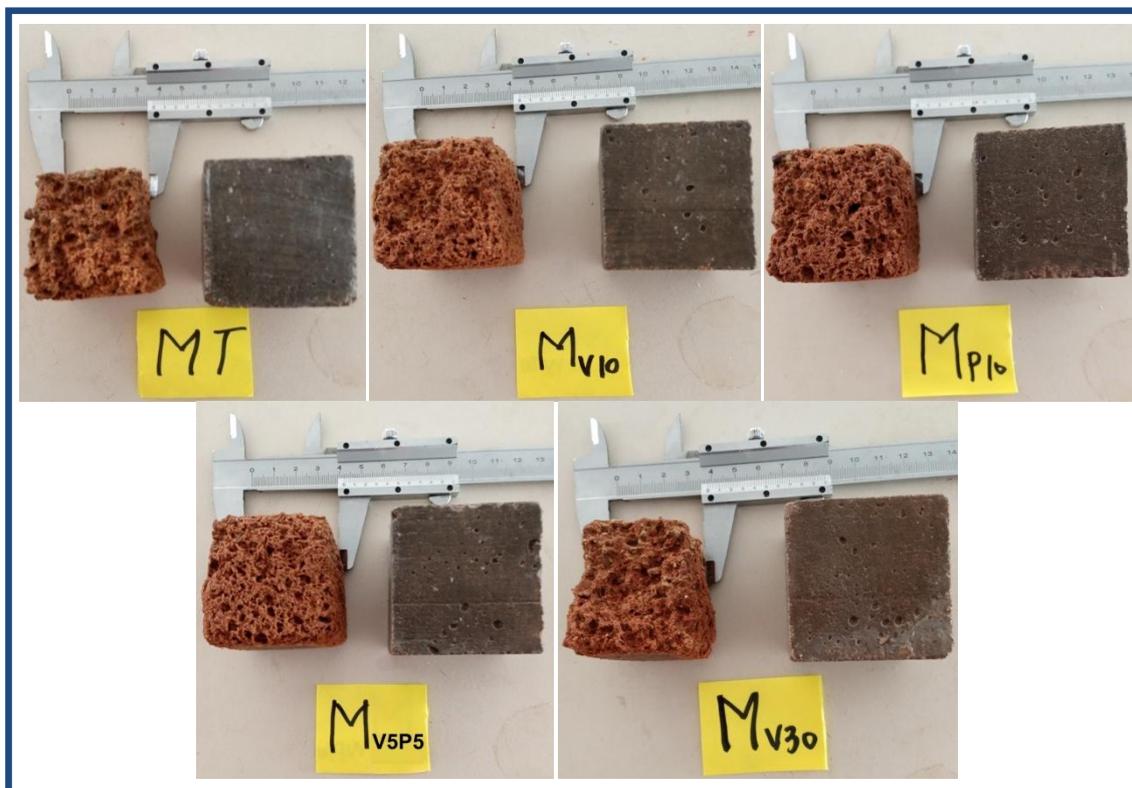


Figure 6. 18- Les mortiers MT, MV10, MP10, MV5P5 et MV30 après 15 semaines d'immersion en acide chlorhydrique 5% de concentration.

La Figure 6.17 montre les résultats d'examen durant l'immersion des dix mortiers dans une solution d'acide chlorhydrique pendant quinze semaines par un suivi de chute des densités de ces mortiers. Au cours des cinq premières semaines les valeurs de la baisse de la densité apparente sont basses et presque stables. Après cinq semaines d'exposition, le rythme de chute des densités augmente davantage qu'auparavant. Après dix semaines d'immersion en acide chlorhydrique, la baisse de densité devient plus rapide, spécialement pour le mortier témoin qui a enregistré la plus haute valeur de chute de densité par rapport aux mortiers contenant des ciments modifiés.



Figure 6. 19- Les dix mortiers après avoir exposé pendant 5 semaines dans l'acide chlorhydrique 5%.

Ces résultats sont essentiellement dus à la réaction du HCl au portlandite, La destruction de la structure du mortier par la décomposition de C-S-H et de C-A-H en présence

du Ca Cl_2 résultant de cette réaction et secondairement à la porosité du mortier (Newman, J. 2003).

Le mortier MV5P5 présente la baisse la plus faible des densités apparentes et les valeurs les plus élevées sont consignées pour les mortiers MT, MV15P15 et MV20.

Parmi les mortiers contenant les additions partiellement substituables au ciment, les plus hautes valeurs de chute de densité ont été enregistrées pour les mortiers MV15P15 et MV20. Cela prouve que le degré de décomposition des taux élevés en C-S-H et la structure intérieure de ces mortiers compte tenu des valeurs d'absorption élevées enregistrées pour les deux mortiers, qui facilite l'infiltration d'acide chlorhydrique à l'intérieur du mortier ce qui facilite la décomposition des composants C-S-H et C-A-H des mortiers.

VI.4.1.1. Inspection de la microstructure des mortiers par microscope à balayage

Comme souligné dans la partie **V.5.4** : l'objectif principal des vues microscopiques est de visualiser la microstructure des mortiers, l'état de porosité et de densité ainsi d'effectuer des comparaisons entre les mortiers étudiés d'une façon à valider les interprétations des résultats obtenus dans le programme expérimental.

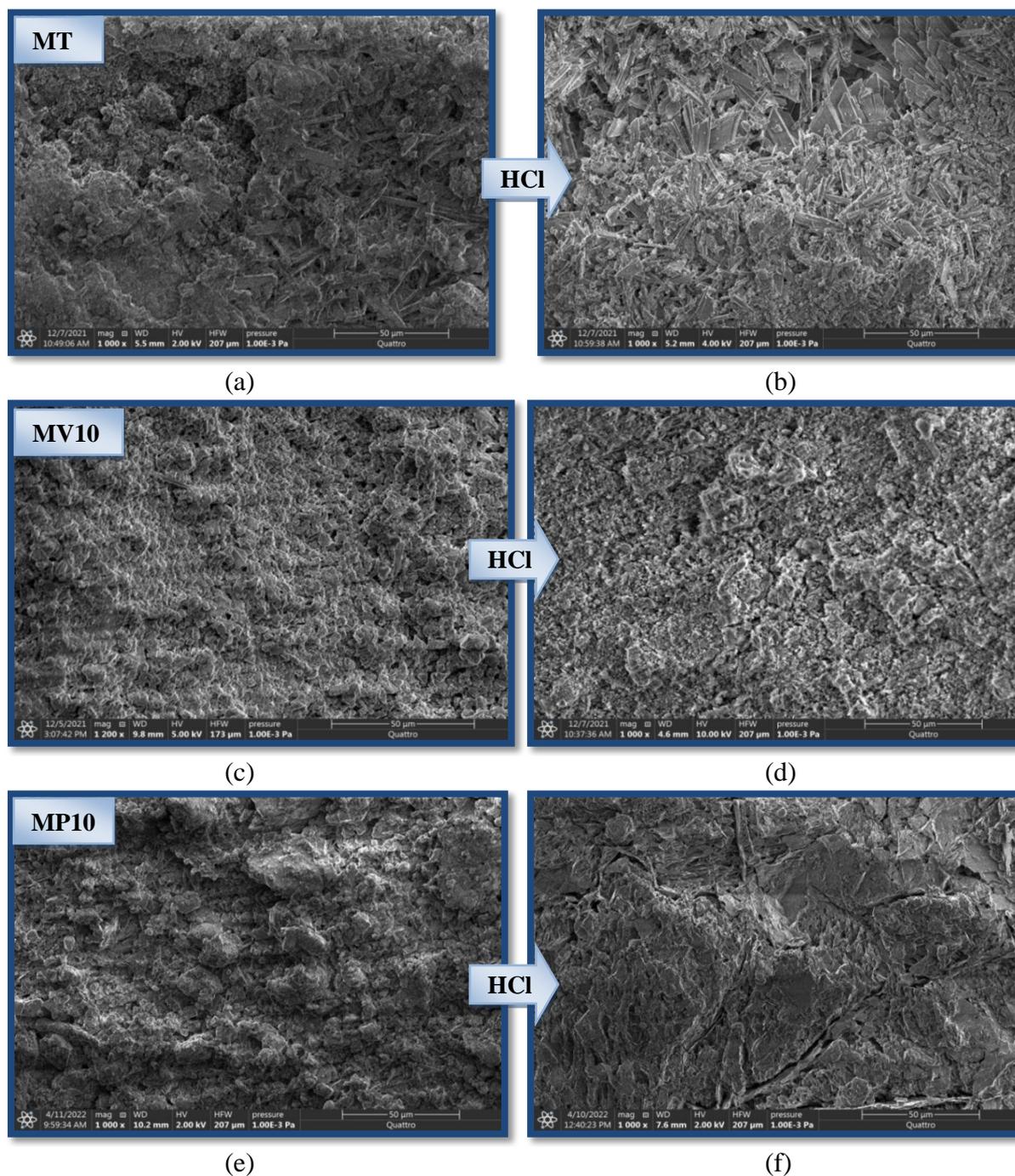
L'inspection microscopique revêt une telle importance qu'elle peut apporter des arguments à l'appui des résultats obtenus, Il s'agit principalement d'observer des fragments de mortier en MEB pour visualiser les phases hydratées influencées par la variation des paramètres de composition et particulièrement la porosité des différents mortiers.

Cinq mortiers ont été choisis pour l'inspection microscopique par MEB (microscope à balayage) sur la base des résultats obtenus lors des essais précédents et particulièrement l'essai d'attaque de l'acide chlorhydrique (Figure 6.18 et 6.19), les mortiers MV30 et MT ont été les moins performants et les mortiers contenant 10 % des APSC à savoir MV10, MP10 et MV5P5 ont prouvé une performance élevée par rapport aux mortiers avec des taux supérieurs en APSC spécialement le MV5P5.

Les Figures 6.20 et 6.21 présentent les vues microscopiques des échantillons des mortiers MT, MV10, MP10, MV5P5 et MV30 à l'âge de 180 jours par microscope à balayage sur échelles 50 μm et 100 μm .

Comme il est clair dans les prises, les mortiers MT et surtout MV30 présentent des porosités plus élevées par rapport aux mortiers contenant 10% des APSC surtout pour le mortier MV5P5 qui paraît le mortier le plus dense parmi les mortiers étudiés.

Ceci confirme les résultats obtenus précédemment concernant les effets bénéfiques des APSC utilisées particulièrement pour les mortiers contenant 10 % des APSC sur l'augmentation de la résistance à la compression, la diminution de l'absorption d'eau l'augmentation de la densité à long terme.



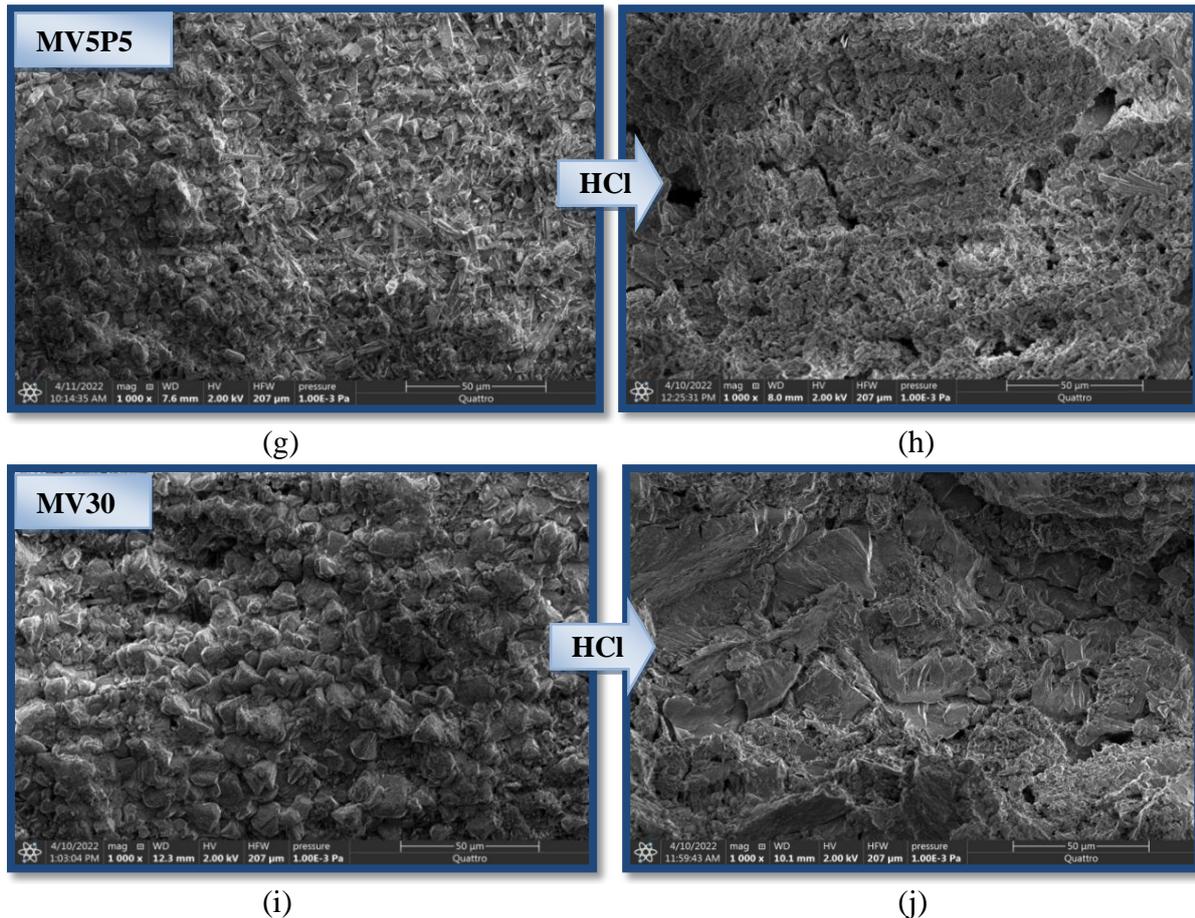


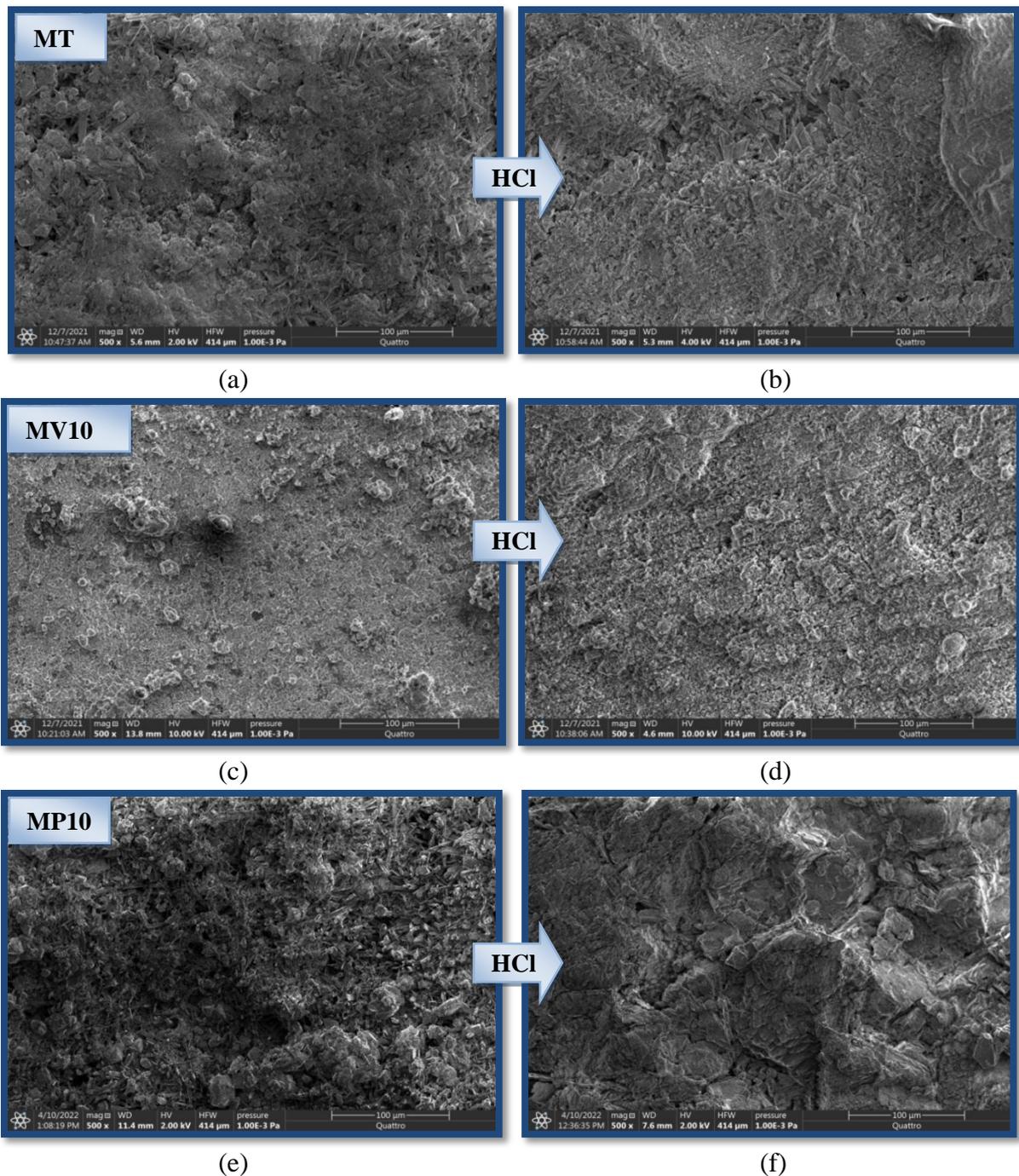
Figure 6.20- Vues microscopiques 50 μm par MEB des mortiers : (a) MT 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux (b) MT exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (c) MV10 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux, (d) MV10 exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (e) MP10 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux, (f) MP10 exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (g) MV5P5 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux, (h) MV5P5 exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (i) MV30 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux et (j) MV30 exposé à 5% HCl durant 15 semaines.

Les vues microscopiques sur échelle 50 μm montrent que le mortier MV5P5 développent une apparition remarquable des aiguilles des C-S-H par rapport aux deux mortiers avec le même taux de remplacement du ciment (10%), ce qui est dû à l'augmentation de la probabilité de la consommation des produits d'hydratation tels que la portlandite et la chaux libre par les deux types des additions pouzzolaniques utilisés (la vase calcinée et la pouzzolane naturelle) et à l'effet filler des particules fines.

Les Figures 6.20 et 6.21 montrent un avantage pour les mortiers MV5P5, MP10 et MV10 par rapport aux deux mortiers MT et MV en matière d'existence des pores. Ce qui est dû au remplissage des vides par les produits des réactions pouzzolaniques à long terme ainsi que le rôle filaire les particules fines des APSC ce qui augmente la densité des mortiers.

Même pour les vues microscopiques avec échelle de 100 μm montrées dans la Figure 6.21, la distribution porale et la densité paraissent plus avantageuses pour les mortiers contenant le taux de substitution 10% par rapport au mortier témoin ainsi qu'au taux de remplacement 30%.

Comme montré dans les vues microscopiques concernant les mortiers subissant une attaque HCl durant 105 jours, des dégradations plus importantes sur la microstructure des mortiers MT et MV30.



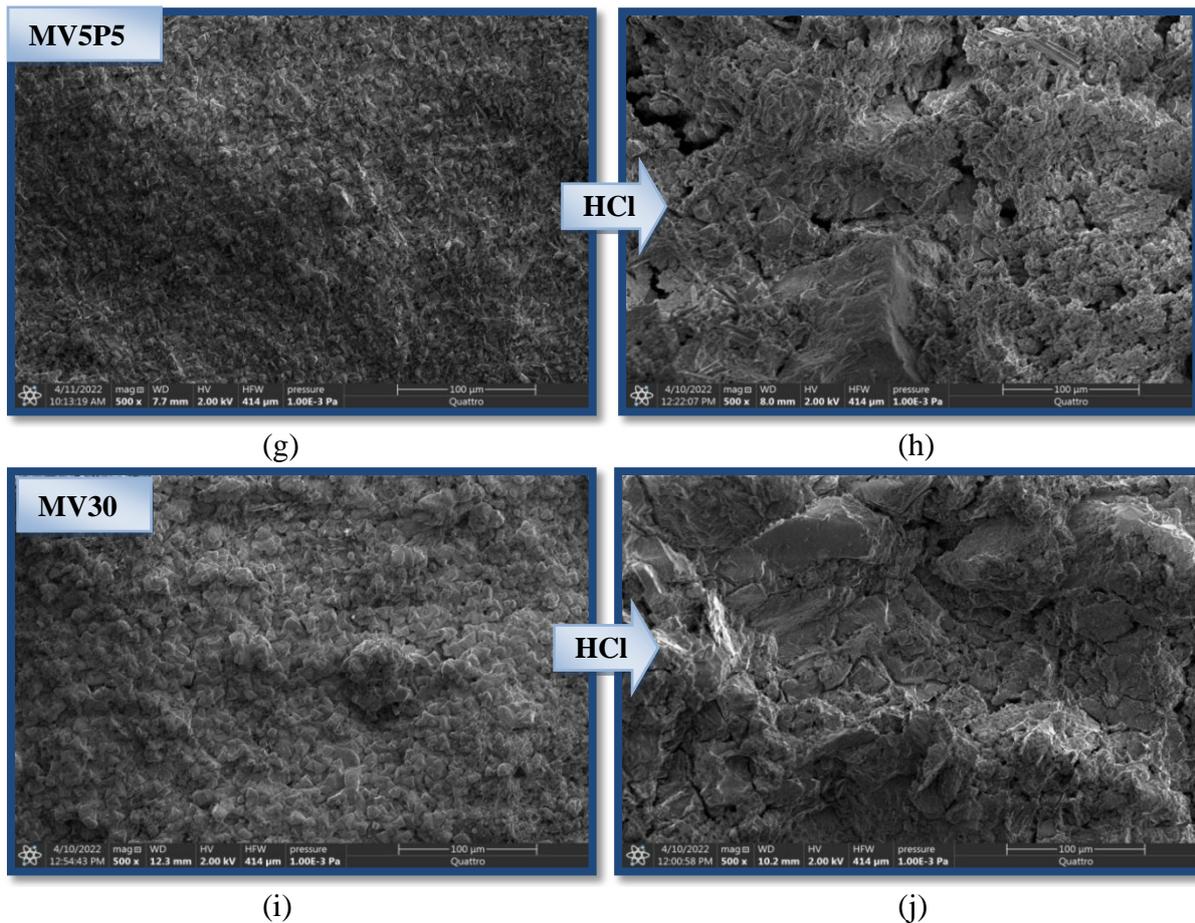


Figure 6. 21- Vues microscopiques 100 μm par MEB des mortiers : (a) MT 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux (b) MT exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (c) MV10 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux, (d) MV10 exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (e) MP10 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux, (f) MP10 exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (g) MV5P5 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux , (h) MV5P5 exposé à 5% HCl durant 15 semaines, (i) MV30 180 jours dans une cure en eau saturée en chaux et (j) MV30 exposé à 5% HCl durant 15 semaines.

Ce qui est principalement lié à la sensibilité des hydrates de ciment Cao et $\text{Ca}(\text{Oh})_2$ dans le cas du mortier témoin (MT) et/ou la porosité élevée pour le mortier MV30 ce qui favorise la pénétration des agents agressifs et participe à la destruction de la matrice cimentaire.

Ces paramètres ont été réduits dans le cas des mortiers MV10, MP10 et MV5P5 (la teneur en Cao et $\text{Ca}(\text{Oh})_2$ et la porosité) ce qui a amélioré le comportement de ces mortiers et a réduit leurs déformations vis-à-vis de l'acide chlorhydrique.

VI.4.2. Résistance des mortiers à l'attaque interne des sulfates (I.S.A)

La Figure 6.22 indique les résultats de variation de la longueur des dix barres de mortiers $25 \times 25 \times 285$ mm dans une cure à eau saturée en chaux durant 350 jours. D'après les

résultats obtenus, il peut être constaté que les dix mortiers couverts par cette étude sont caractérisés par une diminution de longueur variable d'un mortier à un autre dont le mortier MV30 enregistre les plus faibles valeurs et le mortier témoin (MT) les plus importantes valeurs de variation de longueur en diminution (Figure 6.23).

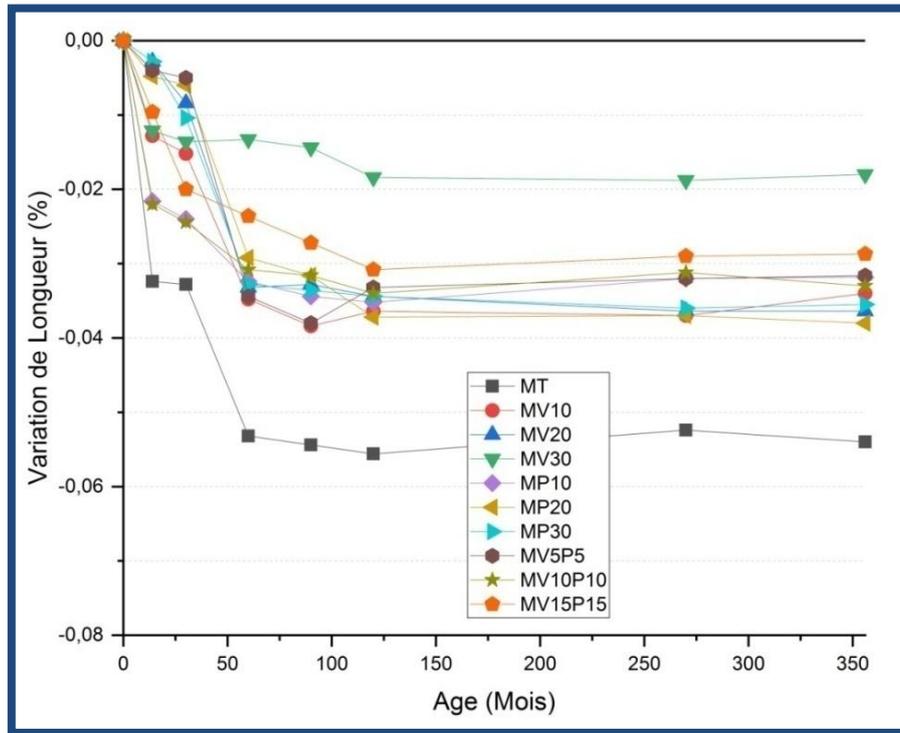


Figure 6. 22- Variation de longueur des dix mortiers.

À jeune âge, ces résultats peuvent être expliqués principalement par le retrait endogène dû aux réactions d'hydratation exothermiques (la chaleur libérée par les ciments) conduisant à des réductions dans les longueurs des éprouvettes variables d'un mortier à un autre (Belas, N. 2008).

Après l'âge de 50 jours, des valeurs stables ont été observées pour tous les mortiers qui ne renferment pas de sulfates (Figure 6.23).

La Figure 6.23 présente les résultats de variation des longueurs des éprouvettes 25×25×285 mm qui ont subi une attaque interne des sulfates. Un comportement différent a été observé en comparaison avec les mortiers qui ne contiennent pas de sulfates.

Lors des premières 150 jours, le comportement des mortiers a été caractérisé par des réductions des longueurs des échantillons comparables aux mortiers qui ne contiennent pas les sulfates de Na_2SO_4 .

Après 150 jours, il a été constaté une augmentation remarquable des longueurs pour les mortiers MV30, MT, MV10, MV15P15 et MV10P10. Ce comportement a été spécialement remarqué sur le mortier témoin ainsi que les mortiers contenant un taux de remplacement du ciment par la vase calcinée seule en tant que APSC.

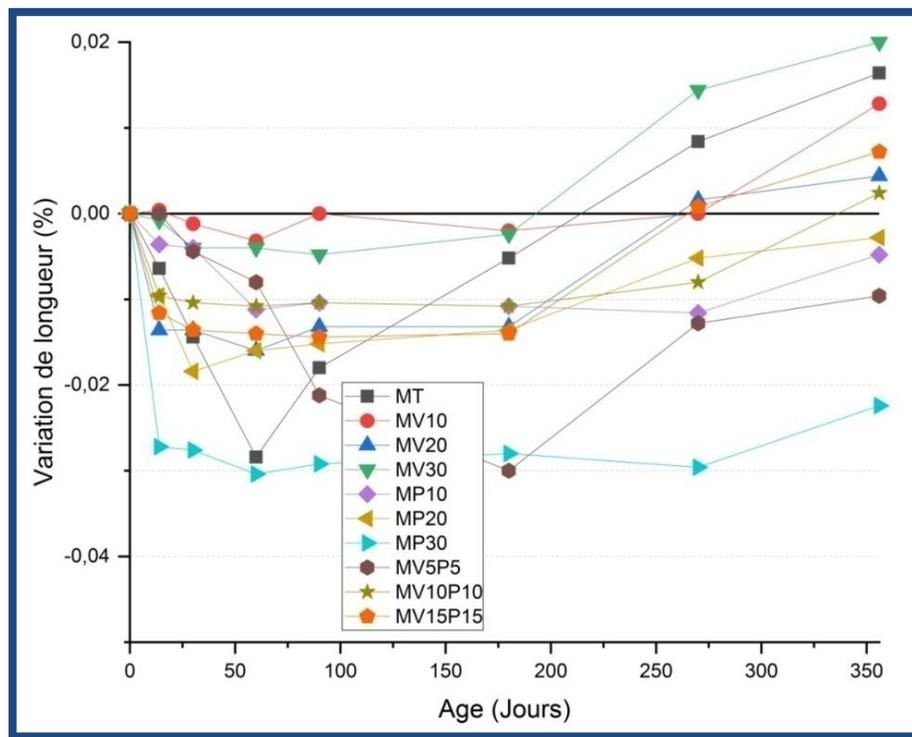


Figure 6. 23- Expansion des mortiers exposés aux attaques internes au sulfate.

Ceci est probablement dû à la présence de sulfates en quantité suffisante, d'alumines, et d'hydroxyde de calcium avec une pénétration d'eau élevés surtout dans le cas des mortiers à base de la vase calcinée ce qui facilite les réactions chimiques permettant la formation d'ettringites et des gypses conduisant à des expansions de la longueur des échantillons (Colman, C. 2021, Elahi, M. M. A. 2022, Yu, X.T. 2018, Li, X. 2022).

La porosité élevée des mortiers contenant la vase calcinée de barrage Chorfa à faciliter la pénétration de l'eau à l'intérieur de la structure des mortiers ce qui a participer à l'accélération des réactions de formation de gypse et de l'ettringite (DEF), ce qui explique l'enregistrement des plus hautes valeurs d'expansions pour les mortiers avec la vase calcinée.

Un meilleur comportement a été constaté pour les mortiers qui contiennent la pouzzolane naturelle seule ou en combinaisons par rapport aux autres mortiers contenant la vase calcinée seule surtout pour les deux mortiers MP30 et MV5P5, ce qui est dû probablement à la non-réactivité des alumines contenues dans la pouzzolane naturelle par rapport à celles de la vase calcinée.

L'essai d'attaque interne des sulfates sur bétons et mortiers est connu par sa lenteur qui peut durer plusieurs années (Nguyen, V. H. 2020), donc de nouveaux résultats peuvent apparaître dans le futur ce qui nous encourage à poursuivre l'essai.

Ces résultats ne s'accordent pas avec les résultats de Safer, O. 2017 et Belaribi, O. 2018 obtenus lors des essais d'attaques externes sur les bétons vu que ces derniers ont utilisé les adjuvants super-plastifiants ce qui a participé à la densification de la structure des bétons et réduit les propriétés de transfert des agents externes tels que l'eau douce et les sulfates et favorise la vase calcinée avec sa qualité pouzzolanique et filler pour empêcher ces types d'attaques.

Par contre dans le cas d'une attaque interne des sulfates avec un mortier facilitant la pénétration de l'eau à l'intérieur de la structure du mortier toutes les conditions de formation différée de l'ettringite sont réunies.

Il est à noter que la combinaison entre la vase calcinée et la pouzzolane naturelle pour utilisation en tant que APSC améliore le comportement des mortiers pour résister à l'attaque interne des sulfates surtout pour la formulation du mortier MV5P5, ceci est dû à la consommation idéale de l'hydroxyde de calcium, la diminution de la porosité ce qui favorable pour résister à ce type d'attaque.

Il est aussi convenable de recommander à refaire l'essai de mesure de variation des allongements des mortiers développés avec des adjuvants superplastifiants pour une durée de suivi plus longue.

VI.4.3. Résistance des mortiers aux hautes températures

La Figure 6.24 présente les résultats de résistance à la compression des mortiers datent de 180 jours après avoir subi des températures élevées de 400 °C, 600 °C et 800 °C pendant 2 heures. La résistance à la compression (R_c) des dix mortiers n'a pas été influencée de façon significative par la température de 400 °C. En comparaison aux résultats des

résistances à la compression (R_c) des mortiers dans des conditions de cure normales 20°C , il est à noter que les résistances à la compression des mortiers contenant les APSC n'ont pas été influencées par la température d'exposition 400°C mais le mortier témoin à enregistrer une légère réduction du R_c du MT (Figure 6.25). Ces résultats sont probablement dus à la sensibilité de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sous cette température. Pour les mortiers contenant APSC, la portlandite était réduite ou éventuellement consommée ce qui a diminué les premiers effets de cette température (400°C) sur la portlandite sensible à des températures entre 350°C à 550°C (Zahedi et al, 2022).

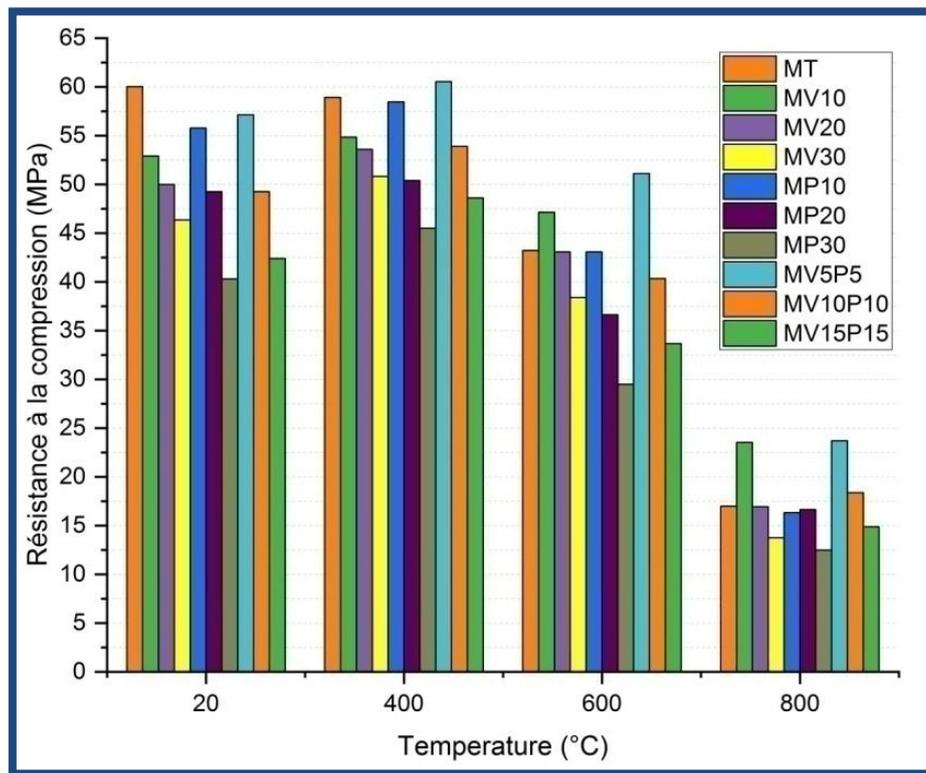


Figure 6. 24- Résistance à la compression des mortiers exposés aux hautes températures.

Pour la température d'exposition de 600°C pendant 2 heures, l'ensemble des mortiers enregistrent une diminution remarquable avec un meilleur comportement mécanique entre les dix mortiers étudiés pour les mortiers MV10 et MV5P5 avec des valeurs de l'ordre de 50 MPa. Les mortiers MV20 et MP10 exposés à 600°C présentent des valeurs R_c similaires à celles de MT R_c de 43 MPa. Les R_c des mortiers restants enregistrent des valeurs moins importantes par rapport au mortier témoin avec la plus faible du R_c pour cette température (600°C) pour le mortier MP30 de l'ordre de 30 MPa.

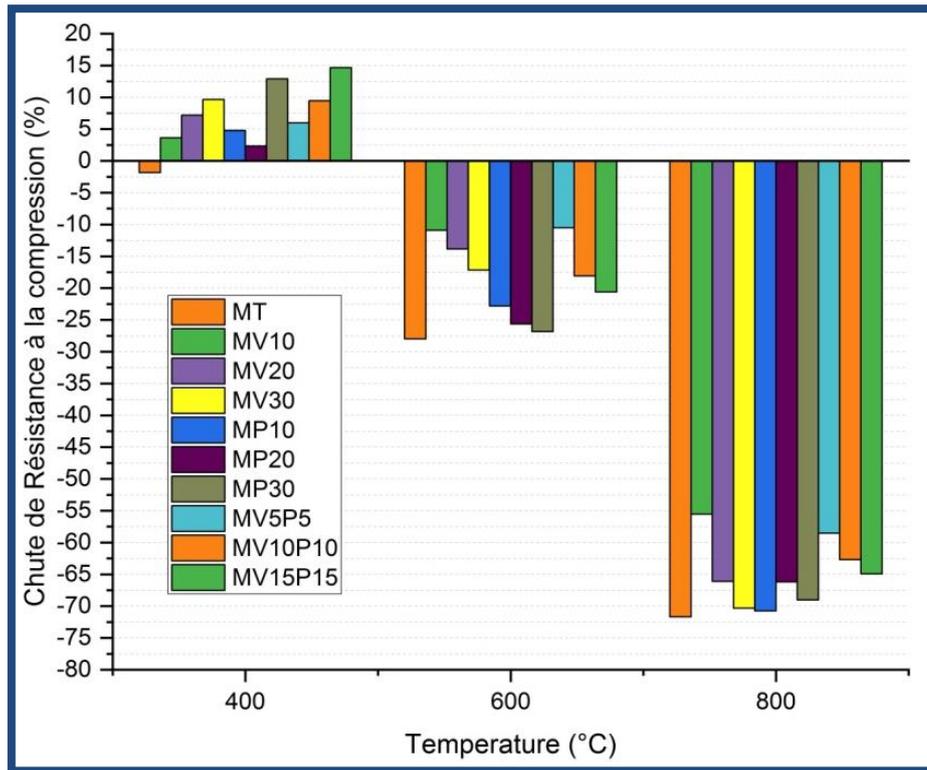


Figure 6. 25- Chute des résistances à la compression des mortiers exposés aux hautes températures.

Sous 600 °C la température ou le portlandite est entièrement décomposé et transformé en chaux, sa réhydratation engendre une extension de 44% ce qui réduit les résistances à la compression jusqu'à 20% (Zahedi et al, 2022. Saridemir, M, 2022. Liu.Y, 2022). C'est ce qui explique la réduction de Rc de tous les mortiers avec des taux variables (Figure 6.26), avec la valeur la plus importante de chute de résistance pour les mortiers MT, MP20 et MP30 dû à la faible consommation de la portlandite par ces derniers.

Pour les mortiers MV5P5, MV10 et MV20 exposés à 600°C la portlandite a été largement consommée par les réactions pouzzolaniques résultant la production des C-S-H qui sont plus résistant à 600°C, ce qui a favorisé la résistance à ces mortiers par rapport au mortier témoin.

Comme indiqué à la Figure 6.25 les meilleurs résultats des chutes de résistance pour les mortiers exposés à 600°C sont ceux des mortiers de l'ordre de 10 %.

Sous 800°C une chute totale de l'ensemble des dix mortiers a été constaté avec des meilleurs Rc pour MV10, MV5P5 et MV10P10 de l'ordre de 25 MPa. Les résistances à la compression des mortiers MV20, MP10, MP20 et MV15P15 similaires à celui du MT de

l'ordre de 17.5 MPa. Les plus faibles valeurs du Rc enregistrés sont celles des MV30 et MP30 avec des valeurs ne dépassant pas les 15 MPa.



Figure 6. 26- Les mortiers après exposition à 800 °C pendant 2 heures.

Entre 600°C à 800°C les bétons perdent 50 à 80% de leurs résistances à la compression (Liu, Y. 2022). Une chute totale de la résistance à la compression (Zahedi,F, 2022) due au phénomène d'évaporation de l'eau qui provoque des efforts internes de traction dépassant les contraintes de résistance des bétons ce qui provoque la destruction (AHSAN et al, 2022).

Comme le montre la Figure 6.26, des fissures ont été observés sur les faces extérieures des mortiers MT, MV10 et MV20 sous 800 °C. En revanche, les autres mortiers ont conservé une meilleure surface extérieure par rapport aux mortiers MT, MV10 et MV20.

Entre 700°C à 900 °C le C-S-H se décompose conduisant à une chute totale du Rc accompagnée par l'apparition des écaillages sur le béton (Saridemir, M, 2022).

VI.4.4. La conductivité thermique des mortiers

Le test de mesure de la conductivité thermique des dix mortiers a été réalisé à l'aide de l'appareil de mesure "ISOMET 2104" qui a permis de mesurer la réponse électrique en température des flux émis par la sonde émettant une impulsion de chaleur électrique.

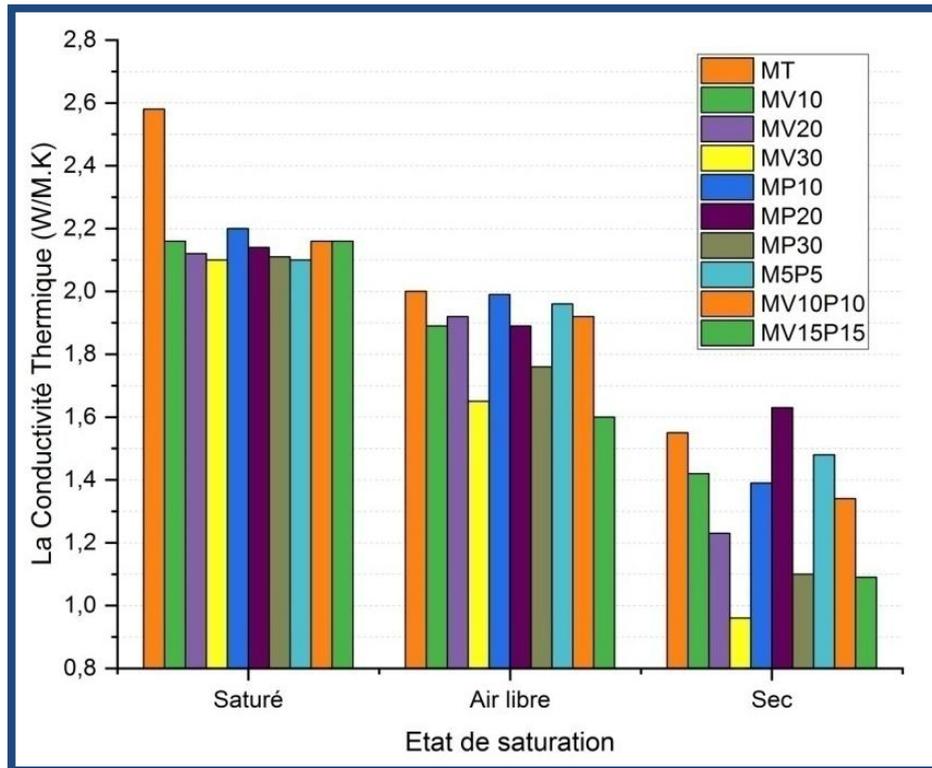


Figure 6. 27- La conductivité thermique des mortiers.

La Figure 6.27 présente les résultats de la conductivité thermique des dix mortiers à trois états de saturation, à savoir saturé, humide à l'air libre et sec. La conductivité thermique (C.T) enregistrée du mortier témoin à l'état saturé est de 2.58 W/M. K. Les valeurs de conductivité thermique pour les mortiers contenant les additions partiellement substituables au ciment sont moins importantes par rapport à MT, généralement de l'ordre de 2.2 W/M.K. La conductivité thermique des mortiers à l'état saturé n'a pas été clairement influencée par le taux de remplacement du ciment par des additions substituables de ciment. La conductivité thermique augmente proportionnellement au taux d'absorption d'eau et diminue avec l'augmentation du taux d'addition partiellement remplaçable au ciment. Ceci explique les valeurs proches de la C.T des mortiers comportant des ajouts à l'état saturé.

En ce qui concerne la C.T des mortiers mis en cure à l'air libre, les résultats obtenus sont moins importants. À l'air libre, le mortier témoin (MT) enregistre une valeur de C.T de 2 W/M. K similaire aux valeurs obtenues des mortiers MP10 et MVP10. Des valeurs de l'ordre de 1.9 W/M. K pour les mortiers MV10, MV20, MP20 et MV10P10 et 1.8 W/M. K pour le MP30. Les deux mortiers MV30 et MV15P15 ont enregistré la plus faible valeur de conductivité thermique de l'ordre de 1.6 W/M. K avec un avantage pour le MV15P15.

Les résultats des tests visant à mesurer la conductivité thermique des mortiers maintenus à l'air libre démontrent l'avantage des mortiers comportant des taux élevés d'ajouts de ciment pour réduire la conductivité thermique des mortiers. Mais l'écart n'est toujours pas clair vu la grande influence de l'humidité sur l'augmentation de la conductivité thermique des mortiers.

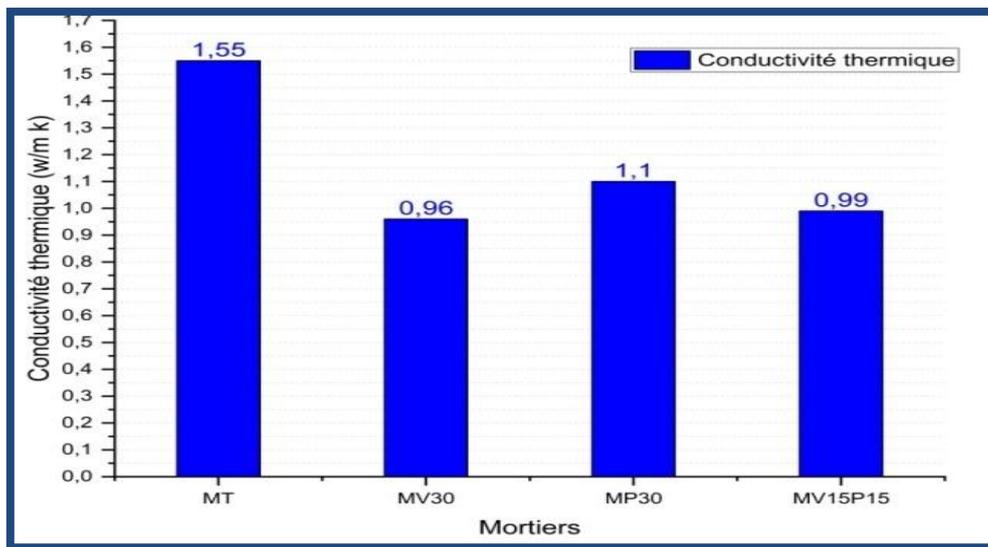


Figure 6. 28- La conductivité thermique des mortiers avec des taux de remplacement du ciment par 30%.

Pour la série des mortiers mesurés à l'état sec, il y a eu une baisse remarquable dans les valeurs de conductivité thermique surtout pour les mortiers contenant des taux élevés en additions substituables pour le remplacement du ciment. L'écart entre les résultats obtenus par le test de mesure de la conductivité thermique des mortiers est plus important dans le cas des mortiers à l'état sec. Il a été remarqué que les mortiers MT, MP20 et MV5P5 ont les valeurs de conductivité thermique les plus élevées de l'ordre de 1,5 W/m.K.

La Figure 6.28 indique les résultats de mesures de la conductivité thermique du mortier témoin en comparaison avec les mortiers contenant des taux de remplacement du ciment par 30% des additions partiellement substituables au ciment à savoir les trois mortiers

MV30, MP30 et MV15P15. Il faut noter que la valeur de conductivité thermique la plus faible du MV30 est de 0,96 W/M.K. La valeur de la conductivité thermique du mortier MV15P15 est égale à 0,99 W/M. K et MP30 à 1,1 W/M. K et MT par rapport à 1,55 W/M.K pour le mortier témoin.

Les résultats obtenus montrent que 30% de la vase calcinée de barrage Chorfa en tant qu'addition cimentaire diminue la conductivité thermique des mortiers par rapport au MT par 38.07 %. 30% de combinaison entre la vase calcinée et la pouzzolane naturelle MV15P15 et 30% de la pouzzolane naturelle MP30 diminuent la conductivité thermique de 36.13% et 29.03% respectivement.

Il est a reporté que les mortiers contenant la vase calcinée, la pouzzolane naturelle et la combinaison entre les deux additions cimentaires enregistrent des valeurs de conductivité thermique plus faibles que celui du mortier témoin dans tous les états de saturation à savoir état saturé, cure à l'air libre et à l'état sec.

Ces résultats sont liés à la densité des mortiers, le degré de saturation, la porosité et le type de l'addition substituable au ciment utilisé dans le mortier.

Ce travail a indiqué que la vase calcinée des barrages en tant que substituant partiel au ciment avec un taux de remplacement de 30% utilisé seul ou en combinaison (50% de vase calcinée et 50% de pouzzolane naturelle) diminue la conductivité thermique des mortiers avec des taux allant jusqu'à 38.07%.

VI. 5. Conclusion

L'élaboration de ce programme expérimental nous a permis de ressortir les principaux points suivants :

- La combinaison entre la vase calcinée et la pouzzolane naturelle pour utilisation en tant qu'addition partiellement substituable au ciment est faisable avec plusieurs avantages techniques offerts.
- L'augmentation de la consommation d'eau est proportionnelle avec le taux de remplacement du ciment par la vase calcinée. Mais, cette demande en eau a légèrement diminué dans les formulations de mortiers et de pâtes contenant les combinaisons entre la vase calcinée et la pouzzolane naturelle.

- Le temps de prise diminue légèrement avec l'augmentation du taux de substitution du ciment avec les APSC, la combinaison n'a pas donné un effet remarquable.
- Pour la résistance à la compression des mortiers à jeune âge, il est à noter un avantage pour les mortiers contenant la vase calcinée et les combinaisons par rapport à la pouzzolane naturelle seule.
- À long terme, les combinaisons et surtout le MV5P5 a donné les meilleures performances mécaniques entre l'ensemble des mortiers.
- Le MV20 présente une résistance à la compression similaire à celle du MV10P10 à long terme, mais à court terme le MV20 est meilleure que le MV10P10 et les deux mortiers MV20 et MV10P10 présentent des meilleurs Rc que celle de MP20 à court et long terme.
- Pour le taux de remplacement de ciment par 30% d'additions APSC, le MV30 est le meilleur mortier en matière de résistance à la compression et en deuxième position le MV15P15 est meilleur que le MP30 à court et à long terme.
- D'après les résultats d'essais d'absorption d'eau et de densités apparentes, ces dernières ont prouvé que la réaction pouzzolanique surtout pour les combinaisons MV5P5 et MV10P10 à long terme, réduit les pores, augmentent la densité des mortiers augmente la résistance à la compression ce qui est bénéfique pour la durabilité des mortiers.
- Pour la résistance chimique vis-à-vis de l'attaque de l'acide chlorhydrique, les résultats ont montré un avantage pour les mortiers MP20, MP10 ensuite MV5P5 qui ont présenté des résistances à l'acide chlorhydrique meilleur que celle du MT, ce qui a été exprimé en valeurs de pertes de masse pendant 15 semaines d'attaque d'autour de 35% pour les MP20 MP10 et MW5P5 contre 60 % pour les MT.
- Les pertes de volumes pendant l'exposition à l'acide chlorhydrique ont été similaires à la perte de masse des mortiers.
- Après l'élaboration du suivi des densités des mortiers exposés à l'acide chlorhydrique, il a été noté une stabilité des valeurs de densités pour l'ensemble des mortiers pendant les 6 premières semaines, ensuite une chute avec des valeurs variables, la baisse valeur de chute de MV5P5 de 4.5% jusqu'à la plus haute chute de densité pour le MT de 7%.

- Pour le comportement des dix mortiers étudié vis-à-vis de l'attaque interne des sulfates (ISA), il peut être noté que les mortiers contenant la pouzzolane naturelle présentent des résistances supérieures à ceux avec la vase calcinée, ce comportement a été amélioré dans le cas des combinaisons entre la vase calcinée et la pouzzolane naturelle surtout pour le mortier MV5P5 qui a été comparable avec le MP30, ce qui est probablement dû à la consommation de la chaux et la diminution de la porosité qui réduit et probablement à la réactivité des alumines contenus dans la vase calcinée.
- Les résistances à la compression des mortiers contenant les APSC utilisées enregistrent un retard par rapport au mortier témoin à jeune âge. Les écarts de résistances entre les mortiers contenant les APSC et le mortier témoin diminuent à long terme, et deviennent similaires. Ce comportement mécanique a été expliqué par la réaction pouzzolanique après l'âge de 90 jours qui participent à la production des C-S-H et C-A-H et l'augmentation des résistances à la compression. Le comportement des mortiers sous de hautes températures a été différent, vu que les mortiers MV5P5 et MV10 résistent mieux que le mortier témoin, et ce dernier (MT) ont enregistré la plus haute valeur de chute de résistance à la compression parmi les dix mortiers (la plus mauvaise). L'ensemble des mortiers contenant les APSC se comportent mieux que le MT sous les hautes températures.

Tableau 6. 1- Tableau récapitulatif des résultats obtenus.

	MT	MV10	MV20	MV30	MP10	MP20	MP30	MV5P5	MV10P10	MV15P15
Etat frais	xxx	xx	/	/	xx	x	/	xx	x	/
Résistance à la compression à court terme	xxx	xxx	x	x	xx	xx	x	xxx	xx	x
Résistance à la compression à long terme	xxx	xx	xx	xx	xx	x	/	xxx	xx	xx
Absorption d'eau	xxx	xxx	x	/	xx	x	/	xx	x	/
Densité apparente	xx	xx	x	x	xx	x	x	xxx	x	x
Attaque HCL	x	xx	xx	/	xxx	xx	x	xxx	xx	x
I.S.A	x	x	xx	x	xx	xx	xx	xxx	x	x
Hautes températures	x	xxx	xx	x	xx	xx	/	xxx	xx	x
Conductivité thermique	/	x	xx	xxx	x	/	xxx	x	xx	xxx

Note :

xxx : Très bon résultat.

xx : Résultat moyen.

x : Résultat acceptable.

/ : Faible résultat.

- La vase calcinée du barrage Chorfa en tant que substituant au ciment diminue la conductivité thermique de 38.07% et enregistre le meilleur résultat parmi les dix mortiers étudiés. La combinaison entre la vase calcinée et la pouzzolane naturelle (MV15P15 de 0.99 W/ M.K) enregistre une valeur inférieure à celle du MP30 de 1.1 W/ M.K. Ces résultats de conductivité thermique peuvent être liés à la densité des mortiers, les proportions des mélanges et la qualité des additions utilisées.
- D'après les résultats obtenus lors des différents essais dont le récapitulatif est résumé dans le Tableau 6.1, il peut être proposé que les mortiers MV5P5 et MV10 pour le développement des mortiers et bétons à hautes performances et les mortiers MV15P15 et MV30 pour être utilisés en tant que mortiers de remplissage ou de crépissage des murs extérieurs.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail « durabilité des mortiers à base des déchets naturels » est axé principalement sur la poursuite des compétences permettant l'utilisation de la vase calcinée des barrages en tant qu'addition partiellement substituable au ciment (APSC). Pour atteindre les objectifs prévus, dix formulations des mortiers contenant des différents taux de remplacement du ciment par des mélanges binaires et ternaires entre le ciment Portland, la vase calcinée et la pouzzolane naturelle ont été mis à l'épreuve par un programme expérimental assurant les investigations nécessaires.

Les résultats obtenus à travers les essais effectués ont prouvé la faisabilité du mélange ternaire entre le ciment Portland, la vase calcinée des barrages et la pouzzolane naturelle, ce qui peut servir durant la première période à intégrer de la vase calcinée dans le secteur de production des ciments en attendant les implantations spécialisées dans les argiles calcinées nécessaires pour une exploitation intégrale permettant de suffire les besoins locaux en la matière.

Après caractérisation à l'état frais, il peut être noté que la vase calcinée nécessite proportionnellement avec l'augmentation du taux de remplacement du ciment une quantité supplémentaire en eau pour atteindre la consistance normalisée, ceci a été expliqué par la finesse élevée de cette vase ainsi que l'irrégularité des particules surtout dans le cas de la vase calcinée. Les combinaisons ternaires sont moins consommatrices d'eau par rapport à la vase calcinée seules, ces combinaisons sont caractérisées par une légère diminution de la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la consistance normalisée généralement similaire à celle de la pouzzolane naturelle en tant que substituant partiel au ciment utilisé seul.

Le temps de prise des pâtes a diminué légèrement avec l'augmentation du taux de remplacement du ciment par les APSC avec des valeurs plus importantes pour le ciment qui contient la vase calcinée ce qui est probablement dû à l'existence des alumines réactives dans

la vase calcinée ce qui accélère la prise du ciment, mais pour la pouzzolane naturelle et les combinaisons le temps de prise n'ont pas été clairement influencés par les additions.

Concernant le comportement mécanique des mortiers étudiés, les éprouvettes contenant la combinaison et la vase calcinée ont enregistré des résistances à la compression supérieures à ceux qui contiennent la pouzzolane naturelle et comparable à celle du ciment témoin à court et long terme; ce qui est dû principalement à la silice et l'alumine réactives dans la vase calcinée et secondairement à la grande finesse des particules inertes joue un rôle filer et participent à la densification de la structure des mortiers ce qui améliore le comportement mécanique des mortiers. À l'exception des taux de remplacement du ciment par 30 % des additions partiellement substituables au ciment où il a été remarqué une chute des résistances à la compression ce qui a été lié au phénomène de dilution et à l'augmentation de la demande en eau ceci augmente la porosité et réduit la densité des mortiers.

L'absorption d'eau après immersion des mortiers contenant les APSC est élevée par rapport au mortier témoin à l'âge de 28 jours surtout pour les mortiers contenant la pouzzolane naturelle, et ces valeurs sont liées au rapport E/L élevé ce qui augmente la porosité des mortiers par rapport au mortier témoin, ces valeurs d'absorption des mortiers contenant la vase diminuent à l'âge de 180 jours, et cette diminution a été expliquée par l'occupation des vides avec le temps par les C-S-H et C-A-H formés à long terme par la réaction entre les composants des APSC et les hydratés du ciment lors de la réaction pouzzolanique, ce qui a compensé l'absorption élevée constatée à jeune âge (28 jours).

Tous les mortiers contenant les additions partiellement substituables au ciment et surtout ceux avec des taux de remplacement de 10% ont présenté une meilleure résistance vis-à-vis de l'attaque de l'acide chlorhydrique par rapport au mortier témoin, ceci est lié à la bonne consommation des éléments sensibles à l'HCl à savoir la chaux libre et l'hydroxyde de calcium (portlandite) ce qui favorise ces mortiers par rapport au témoin qui a présenté une sensibilité supérieure envers ce type d'attaque. Concernant les éprouvettes qui contiennent des taux de remplacement de 30% des APSC, la résistance vis-à-vis de l'HCl enregistrés a été faible vu l'absorption d'eau élevée qui a favorisé l'infiltration de l'HCl et le CaCl_2 à l'intérieur de la structure de mortier et accélère la dégradation, mais ce comportement peut être amélioré par l'utilisation des plastifiants ou super plastifiants permettant une meilleure distribution de particules et diminuant la porosité du mortier.

Pour les mortiers qui ont subi une attaque interne des sulfates durant 356 jours, le comportement n'a pas été claire durant cette période et nécessite une poursuite de suivi de l'allongement des barres de mortiers, mais durant cette durée il peut être noté une probabilité de la réactivité des aluminés que contient la vase calcinée par rapport à celles de la pouzzolane naturelle ce qui explique l'avantage des mortiers à base de cette dernière, mais à long terme d'autres résultats confirmant ou infirmant les suppositions peuvent apparaître.

Aussi, sous l'effet des hautes températures les mortiers à base des additions partiellement substituables au ciment ont présenté une résistance meilleure de celle du mortier témoin, expliqué par la réduction des hydratés du ciment sensible aux hautes températures telles que la chaux libre, l'hydroxyde de calcium et l'ettringite avec un avantage pour les deux mortiers MV5P5 et MV10 ce qui est dû à la bonne proportion entre les APSC et le ciment pour ces formulations.

La vase calcinée du barrage Chorfa en tant que substituant au ciment diminue la conductivité thermique de 38.07% et enregistre le meilleur résultat parmi les quatre mortiers étudiés. La combinaison entre la vase calcinée et la pouzzolane naturelle (MV15P15 de 0.99 W/ M.K) enregistre une valeur inférieure à celle du MP30 de 1.1 W/ M.K. Ces résultats de conductivité thermique peuvent être liés à la densité des mortiers, les proportions des mélanges et la qualité des additions utilisées.

A la fin du travail et suite aux résultats obtenus, il peut être proposé les formulations MV5P5 et MV10 pour développer des mortiers et des bétons à hautes performances utilisables dans les conditions sévères et sites industrielles. Aussi, Une autre classe de formulations telles que le MV30 et MV15P15 est recommandée pour des diverses utilisations de crépissage des murs extérieurs, remplissage et constitution de l'enveloppe des bâtiments. Et pour le cas des mortiers contenant 20% des APSC tels que le MV20 et MV10P10 ces formulations doivent être développées par l'utilisation des adjuvants plastifiants et superplastifiants pour l'amélioration des points de faiblesse tels que l'augmentation de la porosité par l'augmentation du rapport E/L.

Références

AHSAN, Muhammad Hamza, SIDDIQUE, Muhammad Shahid, FAROOQ, Syed Hassan, *et al.* Mechanical behavior of high-strength concrete incorporating seashell powder at elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, 2022, vol. 50, p. 104226.

ALGERIE - La rénovation des équipements du barrage Cheurfas II attribuée à ROUIBA METAL. *BUSINESS FRANCE*, 2019.

ALGERIE PRESSE SERVICE. La production de ciment de l'Algérie atteindra '40 millions de tonnes par an en 2020'. 2018.

ALGERIE PRESSE SERVICE. Lafarge Holcim Algérie effectue sa première exportation de clinker, 2018.

ALGERIE PRESSE SERVICE. Le groupe GICA élu meilleur cimentier e... par le portail électronique AfrikaCem.pdf, 2020.

ALGERIE PRESSE SERVICE. le Groupe GICA réalise sa première opération d'exportation vers l'Europe , 2018.

AL-JABRI, Khalifa S., HAGO, A. W., AL-NUAIMI, A. S., *et al.* Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. *Cement and Concrete Research*, 2005, vol. 35, no 8, p. 1472-1479.

ALMENARES, Roger S., VIZCAÍNO, Leng M., DAMAS, Salvador, *et al.* Industrial calcination of kaolinitic clays to make reactive pozzolans. *Case studies in construction materials*, 2017, vol. 6, p. 225-232.

ASKULSKI, Roman, JÓŹWIAK-NIEDŹWIEDZKA, Daria, et YAKYMECHKO, Yaroslav. Calcined clay as supplementary cementitious material. *Materials*, 2020, vol. 13, no 21, p. 4734.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C642-13. *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, 2013.

ASTM, ASTM. C490 Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste. *Mortar, and Concrete*, 2004, vol. 1, p. 1-5.

ASTM, C. 452-15. Standard: "Standard Test Method for Potential Expansion of Portland Cement Mortars Exposed to Sulfate". *ASTM standards*.

ASTM. C125-Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. 2018.

AVET, François & LI, Xuerun & HABA, Mohsen & BERNAL, Susan & BISHNOI, Shashank & CIZER, Özlem & CYR, Martin & DOLENEC, Sabina & DURDZIŃSKI, Paweł & HAUFE, Johannes & Hooton, Doug & JUENGER, Maria & KAMALI-Bernard, Siham & LONDONO-ZULUAGA, Diana & MARSH, Alastair & MARROCCOLI, Milena & MRAK, Marusa & PARASHAR, Anuj & PATAPY, Cedric & SCRIVENER, Karen. (2022). Report of RILEM TC 267-TRM phase 2: optimization and testing of the robustness of the R3 reactivity tests for supplementary cementitious materials. *Materials and Structures*. 55. 92. 10.1617/s11527-022-01928-6.

BALOCH, Waqas Latif, SIAD, Hocine, LACHEMI, Mohamed, *et al.* A review on the durability of concrete-to-concrete bond in recent rehabilitated structures. *Journal of Building Engineering*, 2021, vol. 44, p. 103315.

BEKHTI, Mohamed el Amine. *Etude structurale de la vase du barrage de chourfa et son application comme matériau de dépollution*. Thèse de doctorat. Université de Sidi Bel Abbès-Djillali Liabes.

BELARIBI, Omar. *Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzoloane*. 2015. Thèse de doctorat. Cergy-Pontoise

BELAS, N., BELARIBI, O., MEBROUKI, A., *et al.* Valorisation des sédiments de dragage dans les bétons. *Séminaire International, Innovation et Valorisation en génie Civil et Matériaux de construction*, Rabat (Maroc), 2011, vol. 23, p. 25.

BELAS, N., BESSEGHIER, N., MEBROUKI, A., *et al.* Sélection des matériaux et des procédés/Materials and processes selection Vers une protection de l'environnement en valorisant la vase draguée du barrage comme composant du béton. 2008.

BELAS, N., BESSEGHIER, N., MEBROUKI, A., *et al.* Vers une protection de l'environnement en valorisant la vase draguée du barrage comme composant du béton. *Matériaux & Techniques*, 2009, vol. 97, no 4, p. 231-240.

BELAS, N., MESBAH, H., MEBROUKI, A., *et al.* Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais. 2008.

BELAS, Nadia, BELARIBI, Omar, AGGOUN, Salima, *et al.* Enhancing the value of dam dredged sediments as a component of a self compacting concrete. *Cem. Wapno Beton*, 2014, vol. 6, p. 370-375.

BELGHIT, A., BOUHAMOU, N. E., HAMADACHE, M., *et al.* Etude de l'influence des hautes températures sur les mortiers à base des matériaux locaux. In : *JOURNEE NATIONALE SUR L'INNOVATION ET LA REHABILITATION EN GENIE CIVIL*". 2022.

BELGHIT, Abdelkadir, BOUHAMOU, Nasr Eddine, HAMADACHE, Miloud, *et al.* THE HYDROCHLORIC ACID EFFECTS ON MODIFIED CEMENT WITH NEW COMBINATIONS BASED ON CALCINED DAM'S MUD AND NATURAL POUZZOLANA. *Stavební obzor-Civil Engineering Journal*, 2022, vol. 31, no 1, p. 85-99.

- BELGHIT, Abdelkadir, BOUHAMOU, Nasr Eddine, HAMADACHE, Miloud, *et al.* The Effect of the Calcined Dam's Mud as Supplementary Cementitious Materials on Thermal Insulation. In : *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Ltd, 2022. p. 121-131.
- BELGHIT, Abdelkadir, BOUHAMOU, Nasr Eddine, HAMADACHE, Miloud, *et al.* The Dam's Calcined Mud as an addition partially substitutable for cement: the behavior towards Hydrochloric Acid attack. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, 2022, vol. 9, no 2, p. 173-185.
- BELGUESMIA, Khalil, BELARIBI, Nadia BELAS, AMIRI, Ouali, *et al.* Influence of treated sediment substitution percentage on workability, strength and porosity of SCC. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, 2018, vol. 5, no 1, p. 47-55.
- BENFETTA, H. N, ACHOUR, B, & REMINI, B. Perte De Capacité Dans Les Barrages Situes Dans Les Zones Arides Et Semi Arides. Cas Des Barrages De Gargar , Bouhanifia , Ouizert Et. *Larhyss Journal*, no. March, 2016.
- BENHELAL, Emad, SHAMSAEI, Ezzatollah, *et* RASHID, Muhammad Imran. Challenges against CO₂ abatement strategies in cement industry: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, vol. 104, p. 84-101.
- BOUCKAERT, Stéphanie, PALES, Araceli Fernandez, MCGLADE, Christophe, *et al.* Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. 2021.
- BOUHAMOU, N., MEBROUKI, A., BELAS, Nadia, *et al.* Valorisation des déchets naturels dans l'élaboration des nouveaux bétons et matériaux de construction. In : *CFM 2011-20ème Congrès Français de Mécanique*. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie, 2011.
- BOUHAMOU, Nasr-Eddine, BELAS, Nadia, BENDANI, Karim, *et al.* Shrinkage behavior of a self-compacting concrete. *Materiali in tehnologije*, 2013, vol. 47, no 6, p. 763-769.
- BOUHAMOU, Nasr-Eddine, MOSTEFA, Fouzia, MEBROUKI, Abdelkader, *et al.* Influence of dredged sediment on the shrinkage behavior of self-compacting concrete. *Mater. Techno*, 2016, vol. 5, no 1, p. 127-135.
- BOUHAMOU, Nasr-Eddine, MOSTEFA, Fouzia, MEBROUKI, Abdelkader, *et al.* THE INFLUENCE OF DREDGED OF NATURAL WASTE ON SHRINKAGE BEHAVIOR OF SELF COMPACTING CONCRETE.
- BOZKURT, Nusret *et* YAZICIOGLU, Salih. Strength and capillary water absorption of lightweight concrete under different curing conditions. 2010.
- BREKAILO, Fernanda, PEREIRA, Eduardo, PEREIRA, Elias, *et al.* Red ceramic and concrete waste as replacement of portland cement: Microstructure aspect of eco-mortar in external sulfate attack. *Cleaner Materials*, 2022, vol. 3, p. 100034.

- CAMANDUCAIA, Laura PM, SANTOS, Nathalia, et MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo A. Mitigation potential of sulfate-resistant Portland cement for internal sulfate attack. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 2022, vol. 7, no 1, p. 1-10.
- CHABI, S., MEZGHICHE, B., et GUETTALA, H. Etude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers. 2004.
- CHANDRA, Satish. Hydrochloric acid attack on cement mortar—an analytical study. *Cement and Concrete Research*, 1988, vol. 18, no 2, p. 193-203.
- CHANG, Zhen-Tian, SONG, Xiu-Jiang, MUNN, Robert, *et al.* Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack. *Cement and concrete research*, 2005, vol. 35, no 8, p. 1486-1494.
- CHEN, Weifeng, HUANG, Bei, YUAN, Yuexue, *et al.* Deterioration process of concrete exposed to internal sulfate attack. *Materials*, 2020, vol. 13, no 6, p. 1336.
- CHOTOLI, Fabiano F., QUARCIONI, Valdecir A., LIMA, Sérgio S., *et al.* Clay activation and color modification in reducing calcination process: development in lab and industrial scale. In : *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, Dordrecht, 2015. p. 479-486.
- COLMAN, Charlotte, BULTEEL, David, THIERY, Vincent, *et al.* Internal sulfate attack in mortars containing contaminated fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 272, p. 121851.
- CSEH, Árpád, BALÁZS, György L., KEKANOVIC, Milan, *et al.* Effect of SCMs on heat transfer properties of LWAC. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021, vol. 144, no 4, p. 1095-1108.
- DE CEUKELAIRE, Luk. The effects of hydrochloric acid on mortar. *Cement and Concrete research*, 1992, vol. 22, no 5, p. 903-914.
- DELENDIA, A. 1962-2012, cinquante ans de recherche démographique en Algérie. Aïssa DELENDIA 1962-2012. *MAWAKIF*, 2012.
- DEMIRBOĞA, Ramazan. Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar. *Energy and buildings*, 2003, vol. 35, no 2, p. 189-192.
- DIXIT, Anjaneya, DAI PANG, Sze, KANG, Sung-Hoon, *et al.* Lightweight structural cement composites with expanded polystyrene (EPS) for enhanced thermal insulation. *Cement and Concrete Composites*, 2019, vol. 102, p. 185-197.
- DJOHAR LAREGE, BOUYACOUB. CARACTERISTIQUES ET EVOLUTION DE LA CONSOMMATION INDUSTRIELLE DE L'ELECTRICITE EN ALGERIE (2000-2014).
- DOUAÏSSIA, Zineb et MERZOUD, Mouloud. Effect of mineral admixtures on the rheological and mechanical properties of mortars. In : *MATEC Web of conferences*. EDP Sciences, 2018. p. 01066.

- DUAN, Ping, SONG, Luxia, YAN, Chunjie, *et al.* Novel thermal insulating and lightweight composites from metakaolin geopolymer and polystyrene particles. *Ceramics International*, 2017, vol. 43, no 6, p. 5115-5120.
- DUPAIN, R., LANCHON, R., et SAINT ARROMAN, J. C. Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. *Edition casteilla*, 2004.
- DZEntreprise, "Ciment: Exportations de 5 millions de tonnes à fin 2021," 2021.
- ELAHI, Md Manjur A., SHEARER, Christopher R., REZA, Abu Naser Rashid, *et al.* Improving the sulfate attack resistance of concrete by using supplementary cementitious materials (SCMs): A review. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 281, p. 122628.
- EN, B. S. 12390-7: 2009. *Testing hardened concrete—Part 7: Density of hardened concrete*, 2019.
- EN, N. F. 196-1. Méthodes d'essais Des Ciments-Partie1: Détermination Des Résistances. *AFNOR: Paris, France*, 2016.
- ESCADEILLAS, Gilles, AUBERT, Jean-Emmanuel, SEGERER, Maximiliano, *et al.* Some factors affecting delayed ettringite formation in heat-cured mortars. *Cement and Concrete Research*, 2007, vol. 37, no 10, p. 1445-1452.
- FABIANI, Claudia, PISELLO, Anna L., et PAKSOY, Halime. 2.30 Novel Building Materials. 2018.
- FATIMA, Taieb, NADIA, Belas, OMAR, Belaribi, *et al.* Influence of calcined mud on the mechanical properties and shrinkage of self-compacting concrete. In : *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2018. p. 01026
- FATIMA, TAIEB. *Contribution à l'Étude du Retrait des Mortiers de Béton Autoplaçant Équivalent à Base de Sédiments de Dragage*. 2019. Thèse de doctorat. Université de Mostaganem.
- FERNANDEZ, Rodrigo, MARTIRENA, Fernando, et SCRIVENER, Karen L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and concrete research*, 2011, vol. 41, no 1, p. 113-122.
- FRANCE, B. Algérie - Programme de désenvasement de 10 barrages à 9,7 Mds DZD. 2018.
- FRANCIOSO, Vito, MORO, Carlos, et VELAY-LIZANCOS, Mirian. Effect of recycled concrete aggregate (RCA) on mortar's thermal conductivity susceptibility to variations of moisture content and ambient temperature. *Journal of Building Engineering*, 2021, vol. 43, p. 103208.
- GHRICI, Mr, KENAI, S., et SAID-MANSOUR, Mr. Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 2007, vol. 29, no 7, p. 542-549.

- GMIRA, Ahmed. *Etude texturale et thermodynamique d'hydrates modèles du ciment*. 2003. Thèse de doctorat. Orléans.
- GOMES, M. Glória, FLORES-COLEN, I., DA SILVA, F., *et al.* Thermal conductivity measurement of thermal insulating mortars with EPS and silica aerogel by steady-state and transient methods. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 172, p. 696-705
- GOMES, M. Glória, FLORES-COLEN, Inês, MELO, Humberto, *et al.* Physical performance of industrial and EPS and cork experimental thermal insulation renders. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 198, p. 786-795.
- GUENANOU, F. Intitulé Durabilité des mortiers contenant la perlite vis - à - vis de la corrosion des armatures, 2019.
- GUENANOU, Farida, KHELAFI, Hamid, et AATTACHE, Amel. Behavior of perlite-based mortars on physicochemical characteristics, mechanical and carbonation: Case of perlite of Hammam Boughrara. *Journal of Building Engineering*, 2019, vol. 24, p. 100734.
- GUERGUEB, M & FERHAT, A. La gestion des eaux en Algérie : Vers un nouveau paradigme Water management in Algeria : Towards a new paradigm. *Journal of Advanced Economic Research*, vol. 06, 2021.
- GUESSAS, Habib, MEKERTA, Belkacem, SEMCHA, Abdélaziz, *et al.* Analyse morpho-sédimentaire des cours d'eau du barrage de Bouhanifia.
- HADJSADOK, Ahmed, KENAI, Said, COURARD, Luc, *et al.* Durability of mortar and concretes containing slag with low hydraulic activity. *Cement and Concrete Composites*, 2012, vol. 34, no 5, p. 671-677.
- HAFIED, Yacine. *Analyse Spatiale et temporelle des transports sédimentaires dans les hydro-systèmes du Nord-Ouest de l'Algérie*. 2021. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider–Biskra.
- HAMADACHE, M., MOULI, M., BOUHAMOU, N., *et al.* Caractérisation des ajouts pouzzolaniques dans le mortier pour l'efficacité énergétique des bâtiments (Characterization of pozzolanic additions in the mortar for building energy efficiency).
- HANEIN, Theodore, THIENEL, Karl-Christian, ZUNINO, Franco, *et al.* Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL. *Materials and Structures*, 2022, vol. 55, no 1, p. 1-29.
- HERNÁNDEZ, José Fernando Martirena, ALMENARES-REYES, Roger, ZUNINO, Franco, *et al.* Color control in industrial clay calcination. *RILEM Technical Letters*, 2020, vol. 5, p. 1-7.
- HOSSAIN, M. M., KARIM, M. R., HASAN, M., *et al.* Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review. *Construction and building materials*, 2016, vol. 116, p. 128-140.

- I. E. Agency. *Net Zero by 2050-A Roadmap for the Global Energy Sector*. vol. 222. 2021.
- IMANE, Diab Djefal. L'envasement dans les barrages de l'Algérie. *Silt Dams Algeria*, 2013, vol. 1, p. 415-418.
- ISO8302-91, Thermal insulation, determination of thermal resistance guarded hot plate method., Model ISOMET 2104, Heat Transfer Analyzer, 1991.
- JAWORSKA-WĘDZIŃSKA, Monika et JASIŃSKA, Iga. Durability of Mortars with Fly Ash Subject to Freezing and Thawing Cycles and Sulfate Attack. *Materials*, 2022, vol. 15, no 1, p. 220.
- JUENGER, Maria CG, SNELLINGS, Ruben, et BERNAL, Susan A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, 2019, vol. 122, p. 257-273.
- KANG, Sung-Hoon, KWON, Yang-Hee, et MOON, Juhuk. Influence of calcination temperature of impure kaolinitic clay on hydration and strength development of ultra-high-performance cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 326, p. 126920.
- KARA, B & NEMDILI, A. Les mesures préventives de lutte contre l'envasement des barrages. in *Coloque international sur la lutte contre l'envasement des barrages*, 2014.
- KUMAR, Rajesh, GOYAL, Shweta, SRIVASTAVA, Abhishek, *et al.* A comprehensive study on the influence of supplementary cementitious materials on physico-mechanical, microstructural and durability properties of low carbon cement composites. *Powder Technology*, 2021, vol. 394, p. 645-668.
- LA ROSA, A. D., RECCA, A., GAGLIANO, A., *et al.* Environmental impacts and thermal insulation performance of innovative composite solutions for building applications. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 55, p. 406-414
- LAKHDAR, K. M. Le Rôle des Exportations Hors Hydrocarbures en Algérie : Le Cas de Lafarge Ciment d'Oggaz Introduction : Méthode préconisée de l'étude : I-Les avantages cumulatifs du commerce international, pp. 62–71, 2018.
- LAOUFI, Imene, LAOUFI, Laid, SENHADJI, Yassine, *et al.* Study of Mortars Made with Natural and Artificial Pozzolans. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, 2019, vol. 6, no 3, p. 427-442.
- LAOUFI, L., SENHADJI, Y., BENAZZOUK, A., *et al.* Evaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposés à une attaque chimique (Assessment of pozzolanic mortars sustainability exposed to chemical attack). *Journal of Material Environmental Science*, 2016, vol. 7, no 5, p. 1835-1845.
- LARBI CHAHT, Fouzia. *Caractérisation des propriétés thermiques des liants hydrauliques au jeune âge: ciment et pouzzolane*. 2012. Thèse de doctorat. Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis.

LASLA, Yamina et OUKACI, Kamal. Le marché du logement en Algérie: Quel état des lieux?. 2018.

LI, Xiaoyu, YU, Xiaotong, ZHAO, Yazhou, *et al.* Effect of initial curing period on the behavior of mortar under sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 326, p. 126852.

LIBERTÉ (Quotidien Algérien). SPMC de Béni Saf vise à produire 500,000 tonnes de pouzzolane, 2010.

LIU, Yue, ZHUGE, Yan, CHOW, Christopher WK, *et al.* Effect of alum sludge ash on the high-temperature resistance of mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, vol. 176, p. 105958.

MAJID, Saima, ALENEZI, Fayadh, MASOOD, Sarfaraz, *et al.* Attention based CNN model for fire detection and localization in real-world images. *Expert Systems with Applications*, 2022, vol. 189, p. 116114.

MAJID, Saima, ALENEZI, Fayadh, MASOOD, Sarfaraz, *et al.* Attention based CNN model for fire detection and localization in real-world images. *Expert Systems with Applications*, 2022, vol. 189, p. 116114.

MALHOTRA, H. L. The effect of temperature on the compressive strength of concrete. *Magazine of concrete research*, 1956, vol. 8, no 23, p. 85-94.

MANSI, Aseel, SOR, Nadhim Hamah, HILAL, Nahla, *et al.* The Impact of Nano Clay on Normal and High-Performance Concrete Characteristics: A Review. In : *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2022. p. 012085.

MICHEL, A. D. A. M. Béton hydraulique. Durabilité et pathologie du béton,

MOHIT, Mehdi, RANJBAR, Ali, et SHARIFI, Yasser. Mechanical and microstructural properties of mortars incorporating ceramic waste powder exposed to the hydrochloric acid solution. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 271, p. 121565.

MOKHTARIA, SABEUR CHOUIREF. La situation socio-économique récente en l'Algérie. *Revue EL-Bahith en Sciences Humaines et Sociales ISSN*, vol. 10, no 05, p. 2018.

MOUNANGA, Pierre, TURCRY, Ph, et POUILLAIN, Philippe. Effets thermique et mécanique de l'incorporation de déchets de mousse de polyuréthane dans un mortier. In : *XXIVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, Construire: un nouveau défi*. 2006.

MUTHU, Murugan, YADAV, Sandeep, et SCHNEIDER, Jörg J. Investigation of the changes in properties and microstructure of graphene oxide-modified cement pastes due to hydrochloric acid attack. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2022, vol. 11, no 2, p. 125-141.

NA 442, Composition, specifications and conformity criteria of common cements, 2003.

- NEWMAN, John et CHOO, Ban Seng (ed.). *Advanced concrete technology set*. Elsevier, 2003.
- NF EN 196-3- Methods of testing cement-part 3: Determination of setting time and soundness., 2017. Edited by AFNOR. (European Standard).
- NF EN 197-1, Composition, specifications and conformity criteria of common cements, AFNOR, 2012.
- NF P 18-452, Concretes - Measuring the flow time of concretes and mortars using a workabilitymeter, AFNOR, 2017.
- NF P 18-545, Aggregates - defining elements, conformity and coding, AFNOR, 2011
- NF P15-437, Hydraulic binders - Testing technics - Characterization of cements by fluidity measurement under mortar vibration, AFNOR, 1987.
- NODEHI, Mehrab et TAGHVAEE, Vahid Mohammad. Applying Circular Economy to Construction Industry through Use of Waste Materials: A Review of Supplementary Cementitious Materials, Plastics, and Ceramics. *Circular Economy and Sustainability*, 2022, p. 1-34.
- NORME, N. F. EN 197-1. *Ciment-Part1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*, 2012.
- OSSENI, Sibiath OG, APOVO, Berléo D., AHOUANNOU, Clément, *et al.* Caractérisation thermique des mortiers de ciment dopés en fibres de coco par la méthode du plan chaud asymétrique à une mesure de température. *Afrique science*, 2016, vol. 12, p. 119-129.
- ØSTNOR, Tone Anita et JUSTNES, Harald. Durability of mortar with calcined marl as supplementary cementing material. *Advances in Cement Research*, 2014, vol. 26, no 6, p. 344-352.
- OUADA, Y. Historique de la production du ciment en Algérie, 2011.
- PARASHAR, Anuj, VOLLPRACHT, Anya, HAUFE, Johannes, *et al.* Report of RILEM TC 267—TRM: Improvement and robustness study of lime mortar strength test for assessing reactivity of SCMs. *Materials and Structures*, 2022, vol. 55, no 3, p. 1-16.
- PEDRAZA, J., ZIMMERMANN, A., TOBON, J., *et al.* On the road to net zero-emission cement: Integrated assessment of mineral carbonation of cement kiln dust. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 408, p. 127346.
- PEI, Yan. *Effets du chauffage sur les matériaux cimentaires-impact du «self-healing» sur les propriétés de transfert*. 2016. Thèse de doctorat. Ecole centrale de Lille.
- PIERKES, Roland, SCHULZE, Simone E., et RICKERT, Joerg. Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementitious materials. In : *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, Dordrecht, 2015. p. 59-66.

PONNAIAH, J., SAKTHIESWARAN, N., BABU, O. Ganesh, *et al.* Natural admixture in blended mortar-mechanical properties study. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 37, p. 1056-1061.

RAMADJI, Christian, MESSAN, Adamah, SORE, Seick Omar, *et al.* Microstructural Analysis of the Reactivity Parameters of Calcined Clays. *Sustainability*, 2022, vol. 14, no 4, p. 2308.

RECENSEMENT. Office National des Statistiques. 2022.

REMINI, Boualem. Algeria: The Mud At The Bottom Of The Dams, What To Do?. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, 2019, no 40, p. 213-247.

REMINI, Boualem. Une nouvelle approche de lutte contre l'envasement des barrages: la technique des obstacles émergés. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, 2011, no 9.

REMINI, Boualem. Beni Haroun et Koudiat Acerdoune (Algérie): deux grands barrages algériens menacés par le phénomène de l'envasement. *Larhyss Journal*, 2019, no 38, p. 131-151.

REMINI, Boualem. La problématique de l'eau en Algérie du nord. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, 2010, no 8.

REMINI, W. et REMINI, B. La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, 2003, no 2.

RIAD, DERABLA. Effet du dosage en superplastifiant sur les caractéristiques des mortiers élaborés à base d'additions minérales (à l'état frais et à l'état durci).

SADOK, Rachid Hadj, BELAS, Nadia, TAHLAITI, Mahfoud, *et al.* Reusing calcined sediments from Chorfa II dam as partial replacement of cement for sustainable mortar production. *Journal of Building Engineering*, 2021, vol. 40, p. 102273.

SADOK, Rachid Hadj, TAHLAITI, Mahfoud, BELAS, Nadia, *et al.* Environmental life cycle assessment of industrialization process of calcined dredged sediments. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, 2019, vol. 6, no 1, p. 25-37.

SAFER, O., BELAS, N., BELGUESMIA, K., *et al.* Influence de l'incorporation de la vase du barrage Chorfa sur les performances mécaniques des bétons ordinaires. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 2017, vol. 3, no 3.

SAFER, Omar, BELARIBI, Nadia Belas, BELARIBI, Omar, *et al.* Resistance of concrete based on treated mud to sea water attack. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, 2021, vol. 8, no 1, p. 111-121.

SAFER, Omar, BELAS, Nadia, BELARIBI, Omar, *et al.* Valorization of dredged sediments as a component of vibrated concrete: Durability of these concretes against sulfuric acid

attack. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2018, vol. 12, no 1, p. 1-11.

SAFER, Omar. *Etude du comportement vis-à-vis des attaques sulfatiques et de la carbonatation d'un béton ordinaire à base de sédiment de dragage*. 2012. Thèse de doctorat. Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis.

SALES, Rosemary Bom Conselho, SALES, Fernando Augusto, FIGUEIREDO, Enio Pazini, *et al.* Durability of mortar made with fine glass powdered particles. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 2017.

SARIDEMIR, Mustafa, BULUT, Metehan, et AKÇA, Uğurcan. Effects of different curing conditions on the long-term properties of alkali activated GBP+ GBFS mortars exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 321, p. 125732.

SASUI, Sasui, KIM, Gyuyong, NAM, Jeongsoo, *et al.* Effects of waste glass sand on the thermal behavior and strength of fly ash and GGBS based alkali activated mortar exposed to elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 316, p. 125864.

SEBAL, R. Aswin Maria, SAKTHIESWARAN, N., BABU, O. Ganesh, *et al.* Effect of micro silica and ground granulated blast furnace slag on performance of rubberized mortar. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 37, p. 1014-1018.

SEMCHA, Abdélaziz. *Valorisation des sédiments de dragage: Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug*. 2006. Thèse de doctorat. Reims.

SENHADJI, Y., ESCADEILLAS, Gilles, MOULI, M., *et al.* Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. *Powder technology*, 2014, vol. 254, p. 314-323.

SEVIM, Ozer et SENGUL, Cagri Goktug. Comparison of the Influence of Silica-rich Supplementary Cementitious Materials on Cement Mortar Composites: Mechanical and Microstructural Assessment. *Silicon*, 2021, vol. 13, no 5, p. 1675-1690.

SHI, Xiaoling, WANG, Xiaolei, et WANG, Xiangling. Dual waste utilization in cemented paste backfill using steel slag and mine tailings and the heavy metals immobilization effects. *Powder Technology*, 2022, p. 117413.

STANDARD, A. S. T. M. ASTM C109-standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars. *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2008.

SURANENI, Prannoy. Recent developments in reactivity testing of supplementary cementitious materials. *RILEM Technical Letters*, 2021, vol. 6, p. 131-139.

TAIEB, F., BELAS, N., et MESBAH, Habib Abdelhak. Influence of treated mud on free shrinkage and cracking tendency of self-compacting concrete equivalent mortars. *Materiales de Construcción*, 2019, vol. 69, no 334, p. e186-e186.

- TAIEB, Fatima, BELAS, Nadia, BELARIBI, Omar, *et al.* Etude à l'état frais des bétons autoplaçants à base de sédiments de dragage. *Academic Journal of Civil Engineering*, 2017, vol. 35, no 1, p. 299-302.
- TEKLAY, Abraham, YIN, Chungen, et ROSENDAHL, Lasse. Flash calcination of kaolinite rich clay and impact of process conditions on the quality of the calcines: A way to reduce CO₂ footprint from cement industry. *Applied Energy*, 2016, vol. 162, p. 1218-1224.
- TOUATI, Bouzid. Les Barrages et la politique hydraulique en Algérie. 2010.
- TOUMI, Ouaheb et REMINI, Boualem. Perte de la capacité de stockage d'eau au barrage de Beni Haroun, Algérie Loss of water storage capacity at the Beni Haroun dam, Algeria. *Systèmes Agraires et Environnement*, 2018, vol. 2, no 1, p. 80-97.
- TOUTANJI, H., DELATTE, N., AGGOUN, S., DUVAL, R., & DANSON, A. (2004). Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete. *Cement and concrete research*, 34(2), 311-319.
- TURK, Kazim, CALISKAN, Sinan, et YAZICIOGLU, Salih. Capillary water absorption of self-compacting concrete under different curing conditions. 2007.
- VEJMELKOVÁ, Eva, KOŇÁKOVÁ, Dana, SCHEINHERROVÁ, Lenka, *et al.* High temperature durability of fiber reinforced high alumina cement composites. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 162, p. 881-891.
- VLADIĆ KANCIR, Ivana et SERDAR, Marijana. Contribution to Understanding of Synergy between Red Mud and Common Supplementary Cementitious Materials. *Materials*, 2022, vol. 15, no 5, p. 1968.
- WANG, Her-Yung, WANG, Wei-Chien, WANG, Jen Chun, *et al.* Evaluation of the engineering properties and durability of mortar produced using ground granulated blast-furnace slag and stainless steel reduced slag. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 280, p. 122498.
- YU, Xiao-tong, CHEN, Da, FENG, Jia-rui, *et al.* Behavior of mortar exposed to different exposure conditions of sulfate attack. *Ocean Engineering*, 2018, vol. 157, p. 1-12.
- ZAHEDI, Farshad et DEHESTANI, Mehdi. Post-fire optimum mechanical properties of self-compacting mortar using Taguchi method and analysis of variance. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 315, p. 125642.
- ZEMOULI, Samira et CHELGHOUM, Noureddine. Utilisation du laitier granulé broyé des hauts fourneaux dans la stabilisation des sols. *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 2018, vol. 36, p. 103-114.