

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة حسيبة بن بوعلي-الشلف
Université Hassiba Benbouali de Chlef
كلية الهندسة المدنية و المعمارية
Faculté de Génie Civil et d'Architecture
قسم الهندسة المدنية
Département de Génie Civil



Mémoire de Master

Filière : Génie Civil
Spécialité : Matériaux en génie civil

Présenté par
DERNANE Khawla

Thème

Utilisation de la vase comme ajout cimentaire

Soutenue le **24/06/2025**, devant le jury composé de:

MEZIANE El Hadj	MCA	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Président
EZZIANE Karim	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Examinateur
BOULEKBACHE Bensaid	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Encadrant

Promotion : **2024 - 2025**

Dédicaces

A ma chère mère, pour son amour inconditionnel, ses prières et ses sacrifices silencieux.

A mon père, pour sa patience, sa sagesse et son soutien constant.

A mes sœurs et frères, pour leur tendresse et leur présence rassurante.

A ma grand-mère, qu'Allah lui accorde sa miséricorde (رحمها الله), pour l'amour qu'elle m'a donné et qui continue de m'accompagner.

Remerciements

Je rends grâce à **Allah**, Le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à **mon encadrant, le Professeur Bensaïd BOULEKBACHE**, pour son accompagnement rigoureux, sa disponibilité et ses conseils précieux qui ont orienté et enrichi ce mémoire tout au long de sa réalisation.

Mes remerciements les plus sincères vont également à **Dr Oualid BELABBAS**, dont le soutien a été constant et déterminant. Il m'a accompagnée avec bienveillance, m'a guidée avec sérieux et n'a cessé de m'encourager à chaque étape. Je lui suis particulièrement reconnaissante pour sa patience, sa générosité et sa confiance tout au long de cette expérience. Son implication humaine et scientifique a été un véritable moteur dans la réussite de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble de mes professeurs de la Faculté de Génie Civil et d'Architecture pour la qualité de leur enseignement, leur disponibilité et leurs précieux conseils tout au long de mon parcours universitaire.

ملخص

تُعدّ صناعة الإسمنت من أكثر الصناعات تلويثًا في العالم، خاصة بسبب الانبعاثات الكبيرة لثاني أكسيد الكربون الناتجة عن إنتاج الكلنكر. وفي سياق الانتقال نحو التنمية البيئية المستدامة، يهدف هذا البحث إلى تثمين الرواسب الطينية (الوحد) المستخرجة من سد سيدي يعقوب، من خلال استخدامها كإضافة إسمنتية جزئية في تركيب المونة الإسمنتية.

تمت معالجة الوحد حراريًا بدرجة حرارة 750 درجة مئوية لتنشيط خصائصه البوزولانية. ثم تم تحضير عينات من المونة باستخدام نسب مختلفة من استبدال الإسمنت (0%، 10%، 20%، 30%) بالوحد المكلسن، مع دراسة خصائصها في الحالة الطازجة والصلبة.

أظهرت النتائج التجريبية أن الوحد المعالج حراريًا يمكنه تحسين بعض الخصائص الميكانيكية على المدى الطويل، مع تقليل الأثر البيئي. وقد لوحظ تحسن ملحوظ في مقاومة الضغط والشد، خاصة عند نسبة استبدال 20%، مما يؤكد على النشاط البوزولاني للوحد. في المقابل، سُجل انخفاض طفيف في قابلية التشغيل، وارتفاع في نسبة الانكماش مع زيادة نسبة الاستبدال.

تمثل هذه التثمين خيارًا محليًا، مستدامًا، واقتصاديًا واعدًا، مع المساهمة في معالجة مشكلة توحل السدود في الجزائر.

الكلمات المفتاحية: الملاق، وحل السدود، المعالجة الحرارية، الإضافات الاسمنتية، النشاط البوزولاني.

Résumé

L'industrie du ciment est l'une des plus polluantes au monde, notamment en raison des émissions massives de CO₂ liées à la production du clinker. Dans un contexte de transition écologique, ce travail de recherche vise à valoriser les sédiments vaseux extraits du barrage de Sidi Yacoub en tant qu'ajout cimentaire partiel dans la formulation de mortiers.

La vase a été soumise à un traitement thermique à 750 °C afin d'activer son potentiel pouzzolanique. Des mortiers ont été fabriqués avec différentes proportions de substitution du ciment (0 %, 10 %, 20 %, 30 %) par la vase calcinée, et leurs propriétés à l'état frais et durci ont été étudiées.

Les résultats expérimentaux montrent que la vase ainsi traitée peut améliorer certaines propriétés mécaniques à long terme tout en réduisant l'impact environnemental. Une amélioration notable de la résistance à la compression et à la traction a été observée, en particulier pour un taux de substitution de 20 %, confirmant l'activité pouzzolanique de la vase. En revanche, une légère baisse de l'ouvrabilité et une augmentation du retrait ont été constatées avec l'augmentation du taux de substitution. Cette valorisation offre une solution locale, durable et économiquement viable, tout en répondant à la problématique de l'envasement des barrages en Algérie.

Mots clés : Mortier ; Vase de barrage ; Ajout cimentaire ; Calcination ; Activité pouzzolanique.

Abstract

The cement industry is one of the most polluting in the world, mainly due to the high CO₂ emissions associated with clinker production. In the context of ecological transition, this research aims to valorize silt sediments extracted from the Sidi Yacoub dam as a partial cementitious addition in mortar formulations.

The silt was thermally treated at 750 °C to activate its pozzolanic potential. Mortars were then prepared with varying replacement ratios of cement (0%, 10%, 20%, and 30%) by calcined silt, and their fresh and hardened properties were studied.

The experimental results show that thermally treated silt can improve certain long-term mechanical properties while reducing environmental impact. A significant improvement in compressive and tensile strength was observed, particularly at a 20% substitution rate, confirming the pozzolanic activity of the silt. However, a slight decrease in workability and an increase in shrinkage were noted as the substitution rate increased. This valorization offers a local, sustainable, and economically viable solution while addressing the issue of dam siltation in Algeria.

Keywords: Mortar; Dam silt; Cementitious addition; Calcination; Pozzolanic activity.

Table des matières

ملخص	iv
Résumé.....	v
Abstract	vi
Introduction générale	2
Chapitre 1 : Recherche bibliographique	5
1.1 Ciment.....	5
1.1.1 Introduction.....	5
1.1.2 Définition	5
1.1.3 Principe de fabrication des ciments.....	5
1.1.4 Constituants du ciment.....	6
1.1.5 Classification des ciments.....	7
1.1.6 Hydratation des composants du ciment	7
1.1.6.1 Hydratation des silicates	7
1.1.6.2 Hydratation des aluminates	8
1.1.6.3 Hydratation de L'aluminoferrite tétracalcique:	8
1.2 Ajouts minéraux.....	9
1.2.1 Fillers calcaires	10
1.2.2 Laitier des hauts fourneaux	10
1.2.3 Cendres volantes.....	10
1.2.4 Fumée de silice	10
1.2.5 Pouzzolanes.....	11
1.2.6 Classification des ajouts minéraux	11
1.2.7 Effets des ajouts minéraux sur les propriétés des mortiers.....	11
1.2.8 Avantages d'utilisation des ajouts minéraux	12
1.3 Vase de barrage.....	13
1.3.1 Introduction.....	13
1.3.2 Envasement	15
1.3.3 Dragage	15
1.3.4 Vase de barrage	16
1.3.5 Valorisation de la vase de barrage	16
1.3.6 Analyse physico-chimique de la vase de barrage	18
1.3.7 Utilisation de la vase dans le domaine des MDC	19
1.3.8 Utilisation de la vase comme ajout cimentaire	20
1.3.9 Traitement des vases	21
1.3.10 Influence des vases sur les propriétés des mortiers	21
1.4 Conclusion	28
Chapitre 2 : Matériaux et matériel d'essais	30
2.1 Introduction.....	30
2.2 Matériaux utilisés.....	30
2.2.1 Ciment.....	30
2.2.2 Vase de barrage	30
2.2.3 Eau de gâchage.....	38

2.2.4	Sable.....	38
1.1.1	Formulation des mortiers	38
2.2.5	Préparation des mortiers	39
2.2.6	Préparation des éprouvettes	40
2.2.7	Conservation des éprouvettes	42
2.3	Essais sur les mortiers frais.....	42
2.3.1	Essais d'ouvrabilité.....	42
2.3.2	Prise de ciment.....	43
2.3.3	Chaleur d'hydratation	44
2.4	Essais sur les mortiers durcis	46
2.4.1	Résistance à la traction par flexion	46
2.4.2	Résistance à la compression	47
2.4.3	Retrait total.....	48
2.5	Conclusion	49
Chapitre 3 : Interprétation des résultats expérimentaux		52
3.1	Introduction.....	52
3.1.1	Propriétés des mortiers à l'état frais	52
3.1.2	Propriétés des mortiers à l'état durci.....	54
Conclusion générale.....		62
Bibliographie.....		65

Liste des figures

Figure 1. 1 : Processus d'hydratation de ciment portland [6].....	9
Figure 1. 2 : Evolution des hydrates avec le temps [6].....	9
Figure 1. 3 : Dépôt de vase.....	15
Figure 1. 4. Opération de dragage.....	16
Figure 1. 5 : Influence de vase sur la chaleur d'hydratation [46].	23
Figure 1. 6 : Flux thermique et chaleur dégagée par les mortiers à partir de 0 %, 5 %, 15 % et 25 % de sédiments calcinés [45].	24
Figure 1. 7 : Résistances à la compression des mortiers à base de vase calcinée à 750, 850 et 950 °C [32].....	25
Figure 1. 8 : Résistances à la compression des mortiers à base de vase de barrage de Chorfa calcinée à 750 °C [49].....	26
Figure 1. 9 : Résistances à la traction par flexion des mortiers à base de vase calcinée à 750, 850 et 950 °C [32].....	27
Figure 2. 1 : Barrage de Sidi-Yacoub.....	31
Figure 2. 2 : Extraction de la vase du barrage.....	32
Figure 2. 3 : Vase avant et après séchage.....	32
Figure 2. 4 : Broyage de la vase dans la machine Micro-Deval.	33
Figure 2. 5 : Calcination de la vase à 750 °C ± 5 °C.....	34
Figure 2. 6 : Evolution de la température du four en fonction du temps.....	34
Figure 2. 7 : Vase avant calcination et après la calcination.	35
Figure 2. 8 : Diffractogramme des rayons X de la vase brute.....	36
Figure 2. 9 : Diffractogramme des rayons X de la vase calcinée à 750 °C.....	36
Figure 2. 10 : Essai de fluorescence des Rayons X.	37
Figure 2. 11 : Courbe granulométrique du sable normalisé.	38
Figure 2. 12 : Malaxeur à mortier.....	40
Figure 2. 13 : Serrage des éprouvettes avec la table à choc.	41
Figure 2. 14 : Moule prismatique.....	41
Figure 2. 15 : Mode de conservation des éprouvettes.....	42
Figure 2. 16 : Mesure de l'étalement pour les mortiers à l'état frais.....	43
Figure 2. 17 : Appareil de Vicat automatique.....	44
Figure 2. 18 : Calorimètre de Langavant.....	46
Figure 2. 19 : Appareil de traction par flexion.....	47
Figure 2. 20 : Essai de compression sur demi-prismes.....	48
Figure 2. 21 : Essai de retrait.....	49
Figure 3. 1 : Variation du dosage de SP en fonction de taux de substitution de la vase.....	53
Figure 3. 2 : Début et fin de prise des mortiers.....	54
Figure 3. 3 : Chaleur d'hydratation des mortiers.....	55
Figure 3. 4 : Masse volumique des mortiers durcis.....	56
Figure 3. 5 : Indice d'activité pouzzolanique de la vase calcinée et brute.....	57
Figure 3. 6 : Résistance à la compression des mortiers.....	58
Figure 3. 7 : Résistance à la flexion des mortiers.	59
Figure 3. 8 : Retrait total des mortiers.....	60

Liste des tableaux

Tableau 1. 1 : Différents types des ciments [4].	7
Tableau 1. 2 : Classification des ajouts selon leur réactivité [14]......	11
Tableau 1. 3 : Etat d'envasement des barrages en Algérie selon (ANBT)	14
Tableau 1. 4 : Analyse chimique de la vase brute [27].	19
Tableau 2. 1 : Composition chimique du ciment utilisé.	30
Tableau 2. 2 : Composition chimique élémentaire du vase brute et calcinée.....	38
Tableau 2. 3 : Composition des mortiers (g).	39

Introduction générale

Introduction générale

L'industrie du ciment joue un rôle central dans les secteurs du bâtiment et des travaux publics, mais elle est également l'une des plus polluantes au monde en raison de la forte consommation énergétique qu'exige la fabrication du clinker. Ce composant principal du ciment Portland est à l'origine d'importantes émissions de CO₂, estimées à près d'une tonne de CO₂ par tonne produite. Face à l'urgence climatique et aux exigences du développement durable, la réduction de l'empreinte écologique du ciment est devenue une priorité pour les chercheurs et les industriels du monde entier.

Dans ce contexte, l'incorporation d'ajouts minéraux dans les ciments constitue une solution à la fois technique, économique et environnementale. Ces ajouts, tels que les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux, les fillers calcaires ou encore les fumées de silice, sont valorisés pour leurs propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques. Leur emploi permet de réduire la part de clinker dans la composition du ciment, tout en améliorant certaines caractéristiques mécaniques ou de durabilité des matériaux à base cimentaire. Cette pratique s'inscrit pleinement dans une logique d'économie circulaire.

Parmi les ressources encore peu exploitées figure la vase de barrage, issue du phénomène naturel d'envasement. Ce phénomène est particulièrement préoccupant dans des pays comme l'Algérie, où il menace la capacité de stockage des barrages et complique leur gestion. Chaque année, des millions de mètres cubes de sédiments sont dragués des retenues, générant des coûts d'entretien élevés et une problématique de traitement ou d'évacuation des boues. Ces sédiments, considérés comme déchets, représentent en réalité une ressource minérale abondante et sous-exploitée.

Les recherches récentes tendent à démontrer que, après un traitement approprié (comme la calcination), la vase de barrage peut présenter des propriétés chimiques et minéralogiques proches de celles des ajouts cimentaires traditionnels. Sa fine granulométrie, sa teneur en silice et en alumine, ainsi que sa disponibilité locale en font un candidat potentiel pour la substitution partielle du ciment dans les formulations de béton et de mortier. Cette valorisation pourrait offrir une double solution : réduire l'impact environnemental de la production de ciment et résoudre le problème du stockage des sédiments dragués.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette démarche de valorisation des matériaux locaux en étudiant l'utilisation de la vase de barrage comme ajout cimentaire. Il propose une analyse approfondie du ciment et de ses constituants, des ajouts minéraux, des caractéristiques de la vase de barrage, ainsi que de leurs traitements pour une intégration efficace dans les matériaux de construction. Cette étude vise à explorer une solution durable, économiquement viable et écologiquement responsable pour le secteur de la construction en Algérie.

Ce travail de recherche vise à valoriser la vase de barrage, un sous-produit souvent considéré comme un déchet, en l'utilisant comme un ajout cimentaire dans la formulation des matériaux à base de ciment. L'objectif principal est de transformer ce matériau sédimentaire, issu de l'envasement des retenues hydrauliques, en une ressource utile et performante dans le domaine du génie civil. Pour cela, l'étude s'attache à caractériser la composition physico-chimique de la vase, à analyser les effets d'un traitement thermique (comme la calcination) sur sa réactivité, et à évaluer ses performances en substitution partielle du ciment Portland. À travers cette double approche valorisation et intégration dans des formulations cimentaires la recherche cherche à réduire l'impact environnemental de la production de ciment tout en proposant une solution locale, durable et économiquement viable à la problématique de l'envasement des barrages.

Ce mémoire est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique approfondie. Il présente le ciment et ses constituants, les différents types d'ajouts minéraux et leur rôle dans les matériaux cimentaires, ainsi que les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des vases de barrage. Ce chapitre met également en lumière les avantages et les enjeux de leur valorisation comme ajouts cimentaires.

Le deuxième chapitre décrit les matériaux utilisés et le protocole expérimental adopté. Il détaille les étapes de traitement de la vase (séchage, broyage, calcination), les essais réalisés (physico-chimiques, diffraction des rayons X, fluorescence X), ainsi que la formulation des différents mortiers testés en laboratoire.

Le troisième chapitre présente l'analyse des résultats expérimentaux. Il évalue les performances des mortiers à base de vase (ouvrabilité, chaleur d'hydratation, résistances mécaniques, retrait) et compare les effets des différents taux de substitution.

Recherche Bibliographique

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

1.1 Ciment

1.1.1 Introduction

L'anglais écossais Joseph Aspdin obtint un brevet en 1824 pour la fabrication d'un liant composé d'un mélange de chaux et d'argile. Il le nomma "ciment Portland" en raison de sa ressemblance, une fois durci, avec la pierre calcaire de la presqu'île de Portland. Ce ciment, considéré comme le premier de son genre, est à l'origine d'une longue lignée de développements dans le domaine des matériaux de construction [1]. Au cours du XXe siècle, les ciments artificiels ont progressivement pris le dessus sur les chaux. Cette tendance s'est accélérée après la Seconde Guerre mondiale, lorsque le secteur du bâtiment s'est orienté vers la production de logements neufs utilisant des éléments préfabriqués, abandonnant ainsi l'usage des chaux. Cette période marque un tournant décisif, où la chaux est sur le point d'être délaissée.

Ce chapitre propose une synthèse bibliographique portant sur le ciment, le processus d'hydratation du ciment et les ajouts minéraux utilisés dans le béton.

1.1.2 Définition

Le ciment est un produit obtenu par broyage du clinker, un mélange de silicates et d'aluminates de calcium, porté à une température de fusion comprise entre 1450 et 1550 °C. Le ciment courant, également appelé liant hydraulique, possède la propriété de s'hydrater et de durcir au contact de l'eau. Cette hydratation transforme la pâte liante, initialement de consistance plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, principalement les silicates et les aluminates de calcium.

1.1.3 Principe de fabrication des ciments

La fabrication du ciment repose sur un processus bien défini. Tout d'abord, le calcaire et l'argile sont extraits des carrières, puis subissent un concassage afin de réduire leur taille. Ces matières premières sont ensuite homogénéisées pour assurer une composition chimique stable. Le mélange est ensuite introduit dans un four rotatif et porté à une température d'environ

1450 °C. Sous l'effet de cette chaleur intense, des réactions chimiques complexes se produisent, donnant naissance à un matériau intermédiaire appelé clinker, qui est ensuite finement broyé. En ajoutant une quantité de 3 % à 5 % de gypse pendant le broyage, on obtient le ciment Portland. D'autres types de ciment peuvent être élaborés en mélangeant ce clinker broyé avec d'autres constituants broyés, possédant des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques. Parmi ceux-ci figurent les laitiers de hauts fourneaux, les cendres volantes et les pouzzolanes, naturelles ou artificielles.

1.1.4 Constituants du ciment

1.1.4.1 Clinker

Le clinker est un matériau intermédiaire obtenu par la cuisson d'un mélange soigneusement dosé et homogénéisé de 80 % calcaire et 20 % d'argile, jusqu'à atteindre une fusion partielle, un phénomène appelé clinkérisation. Ce mélange contient principalement de la chaux (CaO), de la silice (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃), qui réagissent sous l'effet de la chaleur pour former les constituants du clinker [2].

Les éléments simples (CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃) se combinent pour donner les constituants minéraux suivants :

- Silicate tricalcique (C₃S) : 3CaO.SiO₂ (Alite).
- Silicate bicalcique (C₂S) : 2CaO.SiO₂ (Belite).
- Aluminate tricalcique (C₃A) : 3CaO.Al₂O₃.
- Ferro aluminate calcique (C₄AF) : 4CaO. Al₂O₃. Fe₂O₃

1.1.4.2 Le gypse

L'ajout de gypse au clinker joue un rôle essentiel dans la régulation du temps de prise du ciment, en particulier pour les formulations contenant des quantités importantes d'aluminate tricalcique (C₃A). Ce sulfate de calcium agit comme un retardateur en contrôlant la réaction initiale d'hydratation, ce qui permet d'éviter une prise trop rapide et irrégulière. Grâce à la présence de gypse, le début du durcissement du ciment ne survient pas avant au moins 30 minutes après le contact avec l'eau, garantissant ainsi une mise en œuvre optimale. Sans cet ajout, la prise pourrait être trop brusque, rendant le ciment difficile à manipuler et compromettant la qualité du matériau final [3].

1.1.5 Classification des ciments

Selon la présence ou l'absence de constituants additionnels, en dehors du gypse, incorporés au clinker lors du processus de fabrication, différents types de ciments peuvent être obtenus. Ces ciments sont classifiés selon la norme NF EN 197-1.

Le tableau 1.1 ci-dessous présente les différents types de ciments normalisés, en précisant pour chacun leur désignation spécifique ainsi que la répartition en pourcentage des constituants qui les composent.

Tableau 1. 1 : Différents types des ciments [4].

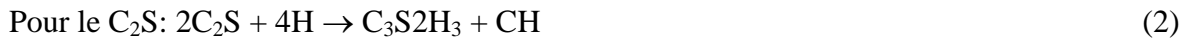
désignations	Type de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un de constituants suivant: laitier pouzzolanes-cendres-calcaires schistes-fumée de silice	Teneur en constituants secondaires (filler)
CEM I	Ciment portland	95 à 100%		0 à 5 %
CEM II/A	Ciment portland Composé	80 à 94%	de 6 à 20 % de l'un des constituants, sauf dans les cas où les constituants est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10% de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus	0 à 5 %
CPJ-CEMII/B		65 à 79%		0 à 5 %
CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35 à 64%	-35 à 65 % de laitier	0 à 5 %
CEM III/B		20 à 34%	-66 à 80 % de laitier	0 à 5 %
CEMIII/C		5 à 19%	-81 à 95 % de laitier	0 à 5 %
CEMIV/A	ciment pouzzolanique	65 à 90%	-10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumée de silice, cette dernière est limitée à 10 %.	0 à 5 %
CEMIV/B		45 à 64%	-36 à 55 %	0 à 5 %
CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64%	-18 à 30 % de laitier et 18 à 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5%
CEM V/B		20 à 39%	-31 à 50 % de chacun des 2 constituants	0 à 5%

1.1.6 Hydratation des composants du ciment

1.1.6.1 Hydratation des silicates

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (C_3S) et les silicates bicalciques (C_2S) se dissolvent sous forme d'ions Ca^{2+} , OH^- et $H_2SiO_4^{2-}$ qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($Ca(OH)_2$). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C_2S ,

la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible [5]. Les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire :



1.1.6.2 Hydratation des aluminates

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme de gypse au clinker pour contrôler ces réactions [5]. La réaction est donnée par :



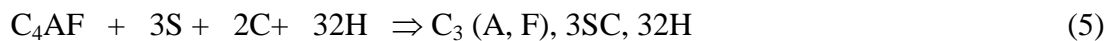
1.1.6.3 Hydratation de L'aluminoferrite tétracalcique:

Le C_4AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C_3A , mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente. Sa réaction est donnée par [5]:

En absence de sulfates :



En présence de sulfate :



La figure 1.1 illustre le processus de formation des hydrates et des aluminates hydratés, caractérisée par le passage transitoire par la phase d'ettringite, et la figure 1.2 montre l'évolution dans le temps des différents hydrates. Dès le début de l'hydratation, on observe l'apparition de la portlandite dont la proportion augmente en parallèle avec les CSH qui apparaissent un peu plus tard. Les aluminates et le monosulfoaluminate apparaissent après les CSH et continuent en plus faible proportion. Il est clair qu'avec la formation des hydrates, la porosité diminue et continue à diminuer à long terme en tendant vers une valeur minimale [6].

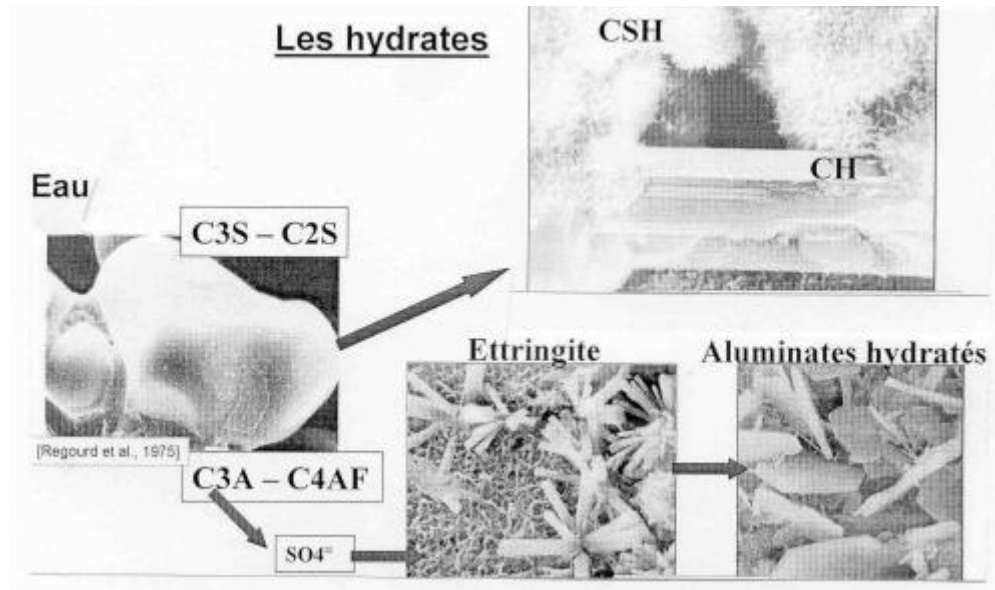


Figure 1. 1 : Processus d'hydratation de ciment portland [6].

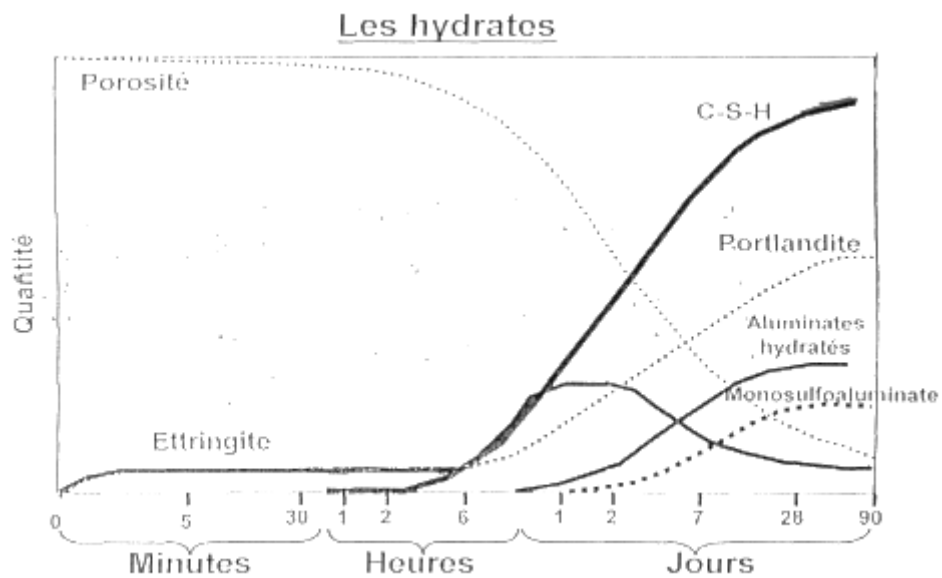


Figure 1. 2 : Evolution des hydrates avec le temps [6]

1.2 Ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des matériaux que l'on mélange au ciment Portland et donnent certaines propriétés au béton, grâce à leurs activités hydrauliques et/ou pouzzolaniques. L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques [7]. Parmi ces ajouts on peut citer :

1.2.1 Fillers calcaires

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection. Ils proviennent de gisements de roches calcaires qui peuvent être dolomitiques, massives ou meubles [8].

1.2.2 Laitier des hauts fourneaux

Le laitier vitrifié moulu est obtenu par le broyage du laitier vitrifié, qu'il soit sous forme granulée ou bouletée. Ce laitier est un sous-produit de la fabrication de la fonte et résulte d'une trempe rapide à sa sortie du four. En revanche, les laitiers de fonte non trempés se cristallisent et ne sont donc pas vitrifiés. Ils sont utilisés comme ballast ou granulats, mais ne conviennent pas comme ajouts cimentaires. De même, les laitiers d'aciéries et ceux issus de métaux non ferreux, pouvant contenir des éléments nuisibles au béton, comme les sels métalliques, sont exclus de l'industrie cimentière [9].

1.2.3 Cendres volantes

Les cendres volantes sont des poudres fines constituées principalement de particules vitreuses de forme sphérique, issues de la combustion du charbon pulvérisé en présence ou non de CO combustibles, ayant des propriétés pouzzolaniques et composées essentiellement de SiO_2 et de Al_2O_3 ; la proportion de SiO_2 réactive constituant au moins 25 % de la masse [10].

1.2.4 Fumée de silice

La fumée de silice, également appelée micro-silice ou fumée de silice condensée, est le terme le plus couramment utilisé. Il s'agit d'un sous-produit de la fabrication du silicium ou du ferrosilicium. Elle se présente sous forme de microsphères de silice dont le diamètre moyen est d'environ 0,1 μm . Sa teneur en silice vitreuse varie entre 75 % et 95 %. La taille fine de ses particules permet d'étendre la granulométrie de l'ensemble du squelette granulaire du ciment en comblant les vides et en augmentant la compacité. De plus, sa structure amorphe permet de déclencher une réaction pouzzolanique par la consommation de la chaux et la création de nouveaux hydrates [11]. D'un point de vue chimique, les fumées de silice sont essentiellement constituées de silice.

Les caractéristiques spécifiques de la fumée de silice en font une pouzzolane hautement réactive, en raison de sa forte teneur en silice, de son état amorphe et de sa finesse extrême.

Son effet bénéfique sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton est principalement attribué à la rapidité de la réaction pouzzolanique ainsi qu'à ses effets physiques (remplissage des vides) [12].

1.2.5 Pouzzolanes

Le terme pouzzolane tire son nom de Pouzzole, une localité près de Naples en Italie, riche en terre volcanique. La pouzzolane naturelle est une roche siliceuse légère produite par des projections volcaniques basaltiques. Elle comporte de la silice, de l'alumine, de l'oxyde ferrique qui lui donne sa couleur rouge, ainsi que de la chaux et de la magnésie. La pouzzolane possède une structure alvéolaire. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise. Il existe également des pouzzolanes artificielles, obtenues par calcination de terres argileuses, de basaltes ou de schistes : leurs propriétés sont équivalentes à celles de la pouzzolane naturelle [13].

1.2.6 Classification des ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont classés selon la norme NF EN 197 1 en deux classes : Inertes et actifs [14]. Ils se divisent selon leur réactivité comme le montre le tableau 1.2.

Tableau 1. 2 : Classification des ajouts selon leur réactivité [14].

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique		Ciments spéciaux, chaux hydraulique
Hydraulique latente	Fortement réactif	Laitier granulé, cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, terres à diatomées)
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire, ...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

1.2.7 Effets des ajouts minéraux sur les propriétés des mortiers

1.2.7.1 Etat frais

Selon Singh et Siddique [15] les particules sphériques des cendres volantes améliorent la rhéologie du mortier en réduisant la demande en eau et en augmentant l'ouvrabilité.

Cependant, un excès peut retarder le temps de prise en raison de leur réactivité pouzzolanique lente.

Bayraktar et al. [16] ont constaté que la fumée de silice, avec ses particules ultrafines, augmente la cohésion du mortier frais mais peut réduire l'ouvrabilité en raison d'une demande en eau accrue.

Juenger et al. [17] ont déclaré le laitier augmente légèrement le temps de prise initiale mais améliore la cohésion grâce à sa granulométrie fine. Son utilisation nécessite souvent des adjuvants superplastifiants pour compenser la viscosité.

1.2.7.2 État durci

Zejak et al. [18] ont démontré que la réaction pouzzolanique à long terme des cendres volantes améliore la résistance à la compression après 28 jours du mortier. Ils ont trouvé qu'un taux de remplacement de 20 à 30 % de ciment par ces derniers optimise les performances mécaniques du mortier.

La fumée de silice comble les pores et accélère la formation des C-S-H, augmentant la résistance à la compression et le module d'élasticité à l'âge précoce (7 jours) et à long terme (28 jours) du mortier [19].

Rashad [20] a souligné que le métakaolin réagit rapidement avec la chaux, générant une microstructure dense et réduisant la porosité. Son étude montre qu'un remplacement de 10 à 15 % de ciment par le métakaolin augmente la résistance à la flexion et à la compression du mortier.

1.2.8 Avantages d'utilisation des ajouts minéraux

La recherche d'un liant moins coûteux en utilisant des déchets industriels et des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour palier au déficit dans la fabrication du ciment portland. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Les ajouts sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir des avantages économiques écologiques et techniques.

1.2.8.1 Avantages économiques

Le ciment Portland est le composant le plus coûteux du béton en raison de sa forte intensité énergétique. Les ajouts cimentaires, souvent issus de sous-produits industriels, sont

moins énergivores et plus économiques. Cependant, les coûts de transport et le manque de stockage abordable peuvent limiter leur avantage économique. À long terme, la demande en béton et les préoccupations liées aux émissions de CO₂ pourraient influencer leur prix et leur utilisation.

1.2.8.2 Avantages écologiques

La production d'une tonne de ciment Portland émet autant de CO₂, tandis que son remplacement par des ajouts cimentaires réduit ces émissions. Les cendres volantes et la fumée de silice nécessitent peu d'énergie pour leur traitement, contrairement au laitier, dont la granulation génère 0.07 tonne de CO₂ par tonne produite. Le transport contribue également aux émissions, avec 0.022 tonne de CO₂ libérée par tonne transportée sur 1 000 km. Ainsi, une évaluation globale est essentielle pour mesurer les bénéfices écologiques des ajouts cimentaires.

1.3 Vase de barrage

1.3.1 Introduction

La valorisation des sédiments figure parmi les recommandations dans de nombreuses études effectuées sur le devenir des sédiments dragués ainsi que sur la préservation des ressources en eau et la protection de l'environnement.

L'Algérie comme plusieurs pays dans le monde est touchée par le phénomène d'envasement qui prend de l'ampleur. Elle entreprend chaque année des travaux gigantesques de dévasement où plusieurs millions de mètres cubes de produits sont dragués. Ces produits de dragage constituent potentiellement une ressource des plus intéressantes. Leur utilisation en tant que substitut partiel au ciment dans la formulation des matériaux cimentaire est préconisée après traitement thermique afin de les rendre réactifs, bien que la thématique de valorisation des sédiments soit encore dans ses débuts, de nombreux travaux de recherches se sont développés ou sont en cours de préparation. En effet ces produits constituent une ressource précieuse et immense et ne devrait pas être considérés comme des déchets.

Le tableau 1.3 présente l'état d'envasement des barrages en Algérie, selon l'Agence nationale des barrages et transferts (ANBT).

Tableau 1. 3 : Etat d'envasement des barrages en Algérie selon (ANBT)

Barrage	Wilaya	Capacité initiale Hm ³	Capacité actuelle Hm ³	Envasement annuel Hm ³ /an
Ghrib	Ain Defla	280	115.32	3.20
Derdeur	Ain Defla	115	105.12	0.83
Harreza	Ain defla	70	76.65	0.28
Djorf Torba	Bechar	350	260.25	1.30
Foum El-gherza	Biskra	47	14.89	0.80
Bou Roumi	Blida	188	181.86	0.80
Ain-Zada	Bordj B.A	125	121.40	0.50
Lekhal	Bouira	30	27.16	0.17
Hamiz	Boumerdes	21	15.53	0.35
Keddara	Boumerdes	145	142.39	0.05
Beni Amrane	Boumerdes	16	11.85	4.10
Oued Fodda	Chlef	228	102.85	2.66
Sidi Yacoub	Chlef	286	252.85	0.17
Hamam	Debag	200	184.35	0.53
Cheffia	El-taref	171	158.83	0.17
Foum El-Gueiss	Khenchla	3	0.43	0.03
Ksob	M'sila	29	12.34	0.30
Bouhanifia	Mascara	73	38.11	0.78
Fergoug	Mascara	18	3.12	1.50
Ouizert	Mascara	100	93.91	0.30
Chorfa	Mascara	82	82.00	0.36
Boughzoul	Medea	55	20.27	0.66
Ladrat	Media	10	8.47	0.02
H.grouz	Mila	45	40.15	0.40
S.m.b.a	Relizane	235	153.71	1.00
Merdja.s.a	Relizane	55	47.97	0.59
Gargar	Relizane	450	358.28	4.50
Ain Dalia	S.Ahras	82.00	76.08	0.75
Sarno	Sidi Bel Abbas	22.00	21.25	0.12
Zardezas	Skikda	31	18.68	0.40
Guenitra	Skikda	125	117.82	0.13
Bakhadda	Tiaret	56	39.94	0.27
Dahmouni	Tiaret	41	39.52	0.40
Meurad	Tipaza	0.30	0.25	0.005
C. Bougara	Tissemsilt	13	11.32	0.30
Beni-bahdel	Tlemcen	63	54.63	0.20
Meffrouch	Tlemcen	15	14.99	0.12
Sidi Abdelli	Tlemcen	110	106.61	0.18

1.3.2 Envasement

L'envasement (figure 1.3) est défini comme étant le dépôt de sédiments dans les retenues et barrages, réduisant ainsi leurs capacités de stockage. La construction d'un barrage change les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement et la capacité de transport des sédiments, transportée par l'écoulement, la matière solide tend à se déposer à l'approche des plans d'eau, car en réduisant sa vitesse, l'écoulement perd petit à petit sa capacité de transport quand le cours d'eau s'approche et se jette dans le lac du réservoir, les particules grossières se déposent en premier ensuite les plus fines jusqu'à atteindre la digue, n'ayant pas où s'échapper le dépôt se tasse et se consolide en réduisant ainsi la capacité de stockage du réservoir, sachant qu'en moyenne 90% des sédiments transportés par le cours d'eau sont piégés [21].

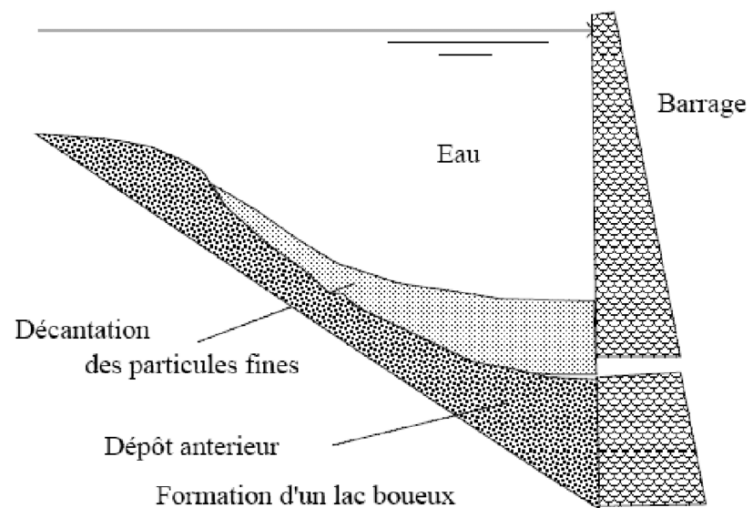


Figure 1. 3 : Dépôt de vase.

1.3.3 Dragage

Le dragage est une opération visant à retirer des matériaux tels que boues, limons, sables et graviers du fond d'un cours d'eau en utilisant des méthodes mécaniques, hydrauliques ou pneumatiques. Cette intervention est réalisée dans le cadre d'aménagements ou d'entretiens, pour effectuer tous les travaux nécessaires afin de restaurer un cours d'eau à ses dimensions naturelles en termes de largeur et de profondeur.

Le premier barrage à avoir fait l'objet d'opérations de dragage en Algérie est celui de Fergoug, situé dans la région de Perrégaux, dans l'ouest algérien. Entre 1986 et 1989, plus de dix millions de m³ de vase ont été retirés [22].



Figure 1. 4. Opération de dragage.

1.3.4 Vase de barrage

Le nom de vase (mot emprunte au Néerlandais) est la désignation d'une large famille de sédiments fins, argileux, plus ou moins organiques, pouvant atteindre des teneurs en eau importantes. Elles contiennent une phase minérale dont la granulométrie s'étend des sables, aux argiles et aux colloïdes, une phase organique et une phase liquide. La vase peut se présenter aussi bien à l'état de suspension (crème de vase) que de sol cohérent (sédiment cohésif) présentant alors un caractère plastique, compressible et thixotropique. Elle contient souvent l'habitat d'une faune riche et diversifiée (vers, mollusques, bactéries)

Les vases sont des sols contenant plus de 90 % de particules inférieures à 0,2 mm, dont la matière organique est comprise entre 2 et 10 %. Elles sont composées de sable, limon, argile et de colloïdes organiques. Elles sont en particulier très abondantes dans les estuaires. Elles sont fréquemment thixotropes [23].

1.3.5 Valorisation de la vase de barrage

L'Algérie enregistre une pluviométrie moyenne annuelle évaluée à 100 milliards de m³, sur lesquels les eaux de ruissellement ou écoulements superficiels représentent environ 12.5 milliards de m³, le reste se partage entre évaporation et infiltration dans le sol.

Aujourd'hui, l'Algérie dispose de plus de 110 barrages en exploitation totalisant une capacité de 4.5 milliards de m³. Or du fait de l'érosion assez sensible (pluie de courte durée, de forte intensité, absence du couvert végétal et relief assez jeune...), l'Algérie perd annuellement une capacité estimée à 20 millions de m³ par le dépôt des sédiments dans les retenues.

Dans de nombreux pays du monde, le transport des sédiments dans les bassins versants et leur dépôt dans les retenues pose aux exploitants des barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse. Non seulement la capacité utile est progressivement réduite au fur et à mesure que les sédiments se déposent dans la retenue mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, qui bien souvent exige que la retenue soit hors service, ce qui est pratiquement impossible dans les pays arides et semi-arides. Dans l'un et l'autre cas, il en résulte des dommages considérables à l'environnement et une mise en péril de l'économie du projet [24].

Des travaux de dévasement ont été entrepris dans plusieurs barrages algériens, mais se sont avérés destructeurs pour l'environnement, puisque des quantités considérables de vase sont déversées dans la nature, portant un préjudice écologique incontournable. C'est pour cette raison qu'il faut tirer la sonnette d'alarme et sensibiliser les chercheurs à étudier tous les aspects chimiques, physiques, minéralogiques et mécaniques de la vase draguée des barrages, afin d'en tirer profit dans le domaine des matériaux de construction par souci d'économie et de contribuer ainsi à la préservation de l'environnement [25].

Compte tenu des énormes volumes dragués des barrages algériens, plusieurs chercheurs se sont penchés sur la gestion et le devenir des boues de dragage. Cette gestion, qui commence toujours par une phase de caractérisation, a pour objet de déterminer les propriétés permettant de préciser les vocations ultérieures du produit. Dans un esprit de développement durable et pour une bonne gestion de l'environnement, plusieurs domaines pour l'utilisation de la vase en tant que matière première et non plus comme déchet ont été ciblés, notamment le génie civil et l'agriculture [25].

Les recherches et études sur la vase draguée des barrages ont permis d'identifier plusieurs utilisations possibles de ce matériau, transformant ainsi un déchet en une ressource précieuse. Parmi les principales applications, on peut citer :

1. Utilisation de la vase dans le domaine des matériaux de construction.
2. Utilisation de la vase comme un noyau d'argile d'un barrage en terre.
3. Utilisation de la vase comme un ajout dans le ciment.
4. Utilisation de la vase dans l'industrie des briques.
5. Utilisation de la vase dans le domaine des techniques routières.
6. Utilisation de la vase dans le domaine d'agriculture.

1.3.6 Analyse physico-chimique de la vase de barrage

1.3.6.1 Constitution des sédiments

Les sédiments se composent d'une fraction solide et d'une fraction liquide (eau) qui est intimement liées les unes aux autres. Les proportions respectives de chacune de ces fractions sont variables d'un milieu à un autre mais demeurent dans une fourchette, qui par expérience, peut être estimée si l'on considère des matériaux de type vases [23].

IL y a quatre éléments principaux constitues les vases [26]:

- La matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates) ;
- La fraction argileuse (kaolinite, illite ou smectite) ;
- La fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, acide fulvique et humiques) ;
- Une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.

1.3.6.2 Granulométrie

La distribution granulométrique d'un sédiment constitue son empreinte physique, elle caractérise la taille des particules, constituant la phase solide du matériau. Pour l'obtenir, il est procédé à un tamisage mécanique. En dessous d'une taille de 20 μm , il est nécessaire de recourir à des mesures au laser, qui utilisent le principe de la diffraction de la lumière cohérente sur un écoulement d'une suspension très diluée de fines. Il est communément considéré que les vases correspondent à la fraction inférieure à 63 μm [23].

1.3.6.3 Analyse chimique

Les résultats de l'analyse chimique de la vase brute l'état naturel et calcinée selon l'étude mené par Semcha sont indiqués dans le tableau 1.4. Sa masse volumique est de 2.63 g/cm^3 et sa surface spécifique Blaine est de 7000 cm^2/g . L'analyse chimique a été réalisée dans des conditions optimales, sur une surface plane. La poudre a été comprimée pour former une pastille, collée sur un porte-échantillon avec du scotch en carbone double face, puis métallisée avant d'être analysée dans le microscope électronique à balayage (MEB). Les proportions des éléments ont été déterminées en combinant les mesures de carbone avec celles des autres éléments, obtenues par fluorescence X [27].

Tableau 1. 4 : Analyse chimique de la vase brute [27].

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Vase brute	41.05	8.64	3.73	20.71	1.93	0.20	1.08	0.52
Vase calcinée	42.56	8.88	3.94	23.56	1.89	0.19	1.14	0.38

1.3.7 Utilisation de la vase dans le domaine des MDC

De nombreux exemples illustrent l'utilisation de la vase dans le domaine du génie civil. Elle peut notamment servir d'argile naturelle brute pour la réalisation du noyau d'argile des retenues collinaires. Elle peut également être incorporée comme ajout au CEMI pour la production d'un CEMII. Par ailleurs, la vase peut remplacer l'argile couramment utilisée dans la fabrication de céramiques. Son emploi a également été rapporté dans d'autres domaines tels que la construction routière [28, 29], la fabrication de briques [30] ainsi que dans les mortiers et bétons [31].

L'utilisation de la vase en tant que liant hydraulique constitue une voie prometteuse de valorisation, dans la mesure où elle contient des minéraux essentiels similaires à ceux présents dans les matériaux cimentaires classiques. Toutefois, cette valorisation n'est envisageable que si la vase possède une teneur suffisante en argile et en calcaire.

Les applications potentielles de ces nouveaux liants sont variées, car les performances mécaniques ne sont pas les seuls critères requis : les propriétés en matière de durabilité ouvrent également de larges perspectives de recherche.

Pour adapter les connaissances acquises à nos matières premières locales, il est nécessaire de réaliser des essais d'activation thermique sur des échantillons de vase. Ce traitement thermique modifie la composition minéralogique du matériau. L'apparition de structures amorphes, combinée à l'ajout de chaux et à la formation de nouvelles phases cristallines, permet la création d'un liant hydraulique.

Le suivi du processus d'activation thermique est assuré par des techniques d'analyse minéralogique telles que la diffraction des rayons X (DRX), l'analyse thermique différentielle (ATD) ou encore l'analyse thermogravimétrique (ATG). Ces analyses permettent de déterminer la température optimale de calcination. Par la suite, des essais sur pâtes durcies et sur mortiers sont menés afin d'évaluer les résistances mécaniques et la durabilité, en vue de statuer sur les performances finales du matériau obtenu.

Par ailleurs, une autre voie intéressante consiste à employer directement la vase dans la fabrication de briques ou de tuiles. Grâce à leur composition minéralogique, les vases séchées puis traitées thermiquement dans des conditions spécifiques de pression et d'humidité peuvent atteindre des résistances comparables à celles des matériaux traditionnels utilisés en construction [27].

En général, les matières premières utilisées en tuilerie nécessitent des traitements mécaniques tels que le concassage, le tamisage ou le lavage. Cependant, dans le cas des vases fluviales, ces opérations sont en grande partie réalisées naturellement par le processus de sédimentation et de transport dans les cours d'eau. La vase extraite à l'aide d'une drague suceuse est ainsi relativement homogène et prête à l'emploi, sans traitement préalable [27].

1.3.8 Utilisation de la vase comme ajout cimentaire

Dans le contexte actuel, l'Algérie est confrontée à une double problématique environnementale. D'abord, celle de la fabrication des ciments CEMI, en raison de leur teneur en clinker élevée (95% en masse) engendre un effet néfaste sur l'environnement. En effet, la production d'une tonne de clinker génère le rejet d'une tonne de CO₂ dans l'atmosphère. Pour pallier à cette problématique environnementale, une des solutions pouvant être envisagée est l'emploi d'addition minérale en substitution partielle du ciment.

La production du ciment Portland, le plus commun des matériaux de construction, a un coût énergétique élevé, calciné à de hautes températures, sa production coûte chère et dégage des gaz à effet de serre portant un énorme préjudice à l'environnement. Le besoin d'un produit de substitution est urgent, la réduction des coûts est cependant liée à la baisse des matériaux de construction. Le ciment à base de ces additions fournit une solution opportune. Les chercheurs collaborent entre eux pour pouvoir élaborer à bon marché à partir des déchets naturels ou industriels en abondance, ou encore les boues de dragage utilisés partiellement en substitution au ciment conventionnel, des matériaux pouvant être introduites à différentes étapes dans les matériaux cimentaires (clinker, ciments, mortiers ou bétons).

En Algérie, plusieurs types de vases des barrages ont été proposés pour leur utilisation autant qu'additions dans les bétons et les mortiers (Bouhnifia, Fergoug et Chorfa) [32-34], disponibles en millions de m³ (32 millions m³ en 2010) et présentant un vrai problème de dépôt après leurs dragages par les services concernés.

1.3.9 Traitement des vases

Sannier et al. [35] ont établi un lien entre le coût de plusieurs traitements appliqués aux sédiments contaminés et l'augmentation de leur résistance. Parmi les solutions proposées, les traitements par calcination et phosphatation se révèlent être les plus onéreux. Selon les travaux de Millrath [36] et Agostini [37], le coût élevé de ces traitements peut rendre l'utilisation des sédiments dragués non rentable, en particulier dans les pays en développement.

Ainsi, pour que l'emploi de ces sédiments dans les mortiers soit économiquement viable, il est essentiel d'identifier des traitements à la fois simples à mettre en œuvre et peu coûteux. Par ailleurs, les tunnels sont des ouvrages exposés, dans certains cas, à des environnements agressifs. Par conséquent, les caractéristiques des sédiments dragués doivent être comparables à celles des sables, et les mortiers fabriqués à partir de ces sédiments doivent présenter des propriétés mécaniques satisfaisantes, aussi bien dans des conditions ordinaires que dans des milieux agressifs où la durabilité est primordiale.

Azrar et al. [38] ont déclaré que lorsque les sédiments sont inertes (non calcinés), ils peuvent être utilisés comme granulats. Il a été déterminé que la distribution granulométrique de ces sédiments est principalement composée de particules très fines (inférieures à 50 μm) [39]. La calcination conduit à une masse volumique substantielle obtenue avec du ciment basé sur la substitution partielle par des sédiments traités à 600 °C.

Les recherches sur l'utilisation de sédiments de dragage non traités dans les mortiers ont donné des résultats mitigés. Allal et al. [40] ont montré une diminution de la résistance à la compression d'environ 30 % pour un mortier dont la composition a été modifiée par la substitution de 20 % de sable par des sédiments bruts collectés dans les ports de Tanger (Maroc).

Des recherches antérieures sur l'utilisation de sédiments marins dragués traités dans les mortiers ont parfois montré que ces traitements permettaient d'obtenir les caractéristiques mécaniques requises [37, 41].

1.3.10 Influence des vases sur les propriétés des mortiers

1.3.10.1 Ouvrabilité

Selon Limeira [42], l'ouvrabilité des mortiers et bétons dépend de la granulométrie des granulats, de la quantité d'eau du mélange et du pourcentage des sédiments ajoutés.

En raison de la morphologie de leurs particules, la présence de tels matériaux calcinés dans les mélanges cimentaires semble diminuer l'ouvrabilité et modifier la consistance du mortier.

Kazi Aoual-Benslafa et al. [43] ont constaté une réduction significative de l'ouvrabilité des mortiers à mesure que le taux de substitution des sédiments augmente. La distribution granulométrique des sédiments contribue à accroître la compacité du mélange granulaire (ciment + sable + sédiments), et une partie de l'eau libre, indispensable à l'hydratation du ciment, est absorbée par les sédiments. Par conséquent, il devient nécessaire d'augmenter le rapport eau/ciment afin de maintenir une fluidité constante des mortiers.

Laoufi et al. [32] ont souligné que la maniabilité des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de remplacement du ciment par la vase de barrage. Par conséquent, plus le taux de substitution du ciment par la vase calcinée est élevé, plus la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la même ouvrabilité augmente.

La diminution de l'ouvrabilité en fonction du dosage de la vase calcinée s'explique par les effets induits par la calcination à haute température. En effet, lorsque la vase est calcinée à des températures supérieures à 100 °C, l'eau liée s'en échappe, rendant ainsi la vase plus avide d'eau. Cela entraîne la formation de flocs stables dans la pâte du liant, lesquels emprisonnent une partie de l'eau, la rendant indisponible pour le malaxage. Par conséquent, une quantité d'eau supplémentaire est nécessaire pour obtenir une pâte de mortier maniable [32]. Cette floculation est principalement due à la présence d'un grand nombre de charges positives et négatives à la surface du liant, qui ont tendance à se regrouper lorsqu'elles sont mises en contact avec un liquide polaire tel que l'eau [44].

Hadj Sadok et al. [45] ont indiqué que, pour maintenir une bonne dispersion des sédiments calcinés, il est nécessaire d'augmenter le rapport E/L ou la teneur en plastifiant, parce que les sédiments absorbent une certaine quantité d'eau grâce à leur grande finesse par rapport au ciment.

1.3.10.2 Chaleur d'hydratation

La chaleur d'hydratation du ciment correspond à la chaleur libérée lors de sa réaction chimique avec l'eau, appelée réaction d'hydratation. Cette réaction est exothermique, ce qui signifie qu'elle dégage de la chaleur. La quantité de chaleur produite dépend de plusieurs facteurs, notamment la composition du ciment, le rapport eau/ciment, la température ambiante, ainsi que la température initiale du béton.

Benzerzour et al. [46] ont déterminé la chaleur d'hydratation de trois mortiers formulés à partir de sédiments traités provenant du port de Dunkerque : un mortier témoin (RM), ainsi que deux mortiers contenant respectivement 8 % et 15 % de sédiments MSC8 et MSC15 (Figure 1.4). Le mortier témoin a atteint une température maximale de 51.9 °C après 17.80 heures, correspondant à une chaleur dégagée de 220.08 J/g. Quant aux mortiers incorporant 8 % et 15 % de sédiments, ils ont atteint respectivement des chaleurs d'hydratation de 262.45 J/g et 265.47 J/g, après 15.60 heures et 15.90 heures.

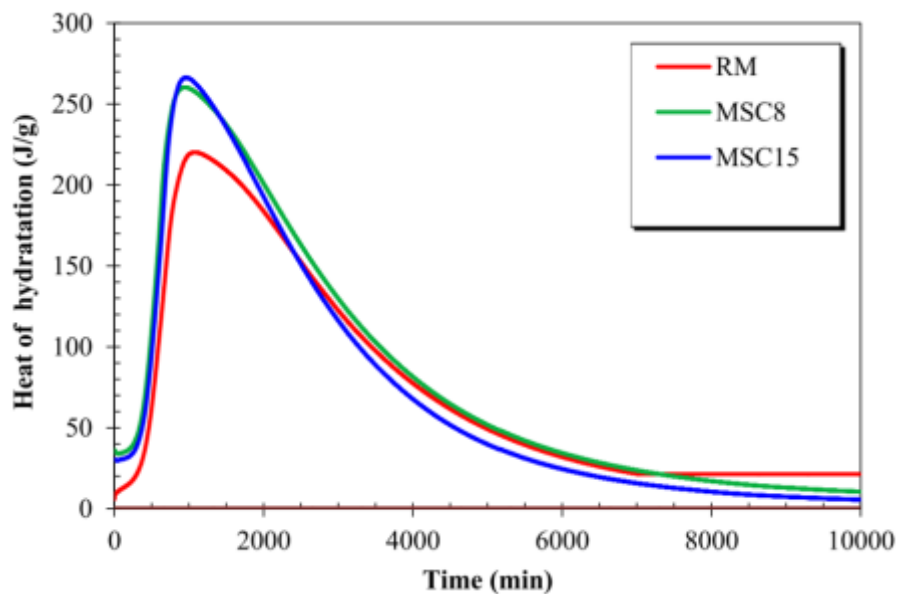


Figure 1. 5 : Influence de vase sur la chaleur d'hydratation [46].

Hadj Sadok et al. [45] ont évalué l'effet thermique de la substitution partielle du ciment par des sédiments calcinés (provenant de Chorfa II) à différents taux (0 %, 5 %, 15 %, 25 %) sur le comportement d'hydratation des mortiers. Les courbes thermiques montrent une évolution similaire entre les différents taux de substitution, mais avec une tendance générale à la diminution de la chaleur dégagée à mesure que le taux de remplacement augmente (Figure 1.5). Ils ont expliqué cette baisse par un retard de la réaction d'hydratation induit par les additions minérales. Les mortiers contenant 0 % et 5 % de sédiments présentent un flux thermique plus élevé que ceux avec 15 % et 25 %, surtout en présence de l'adjuvant à des dosages élevés (0.45 % et 0.85 % en extrait sec).

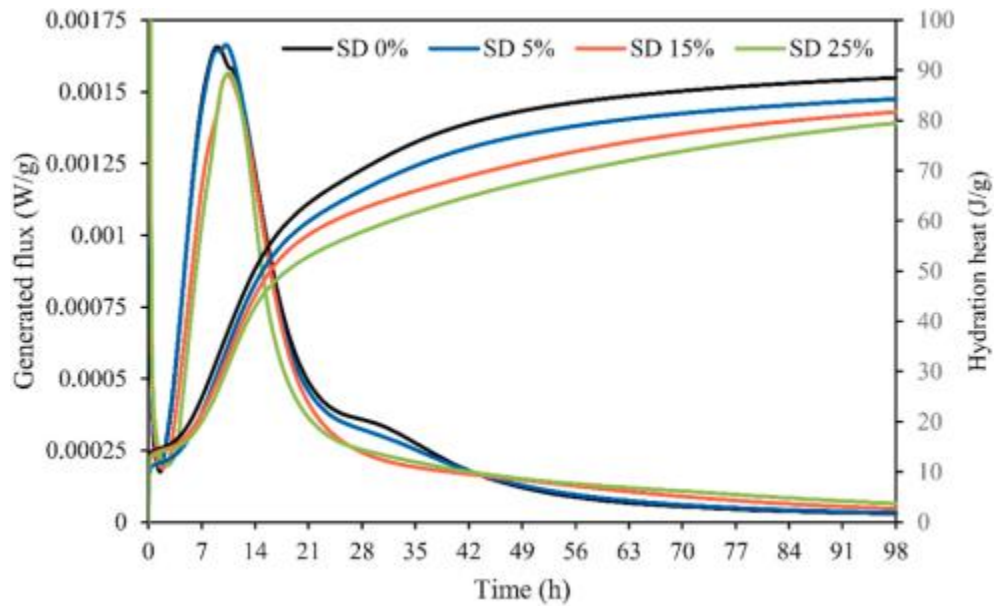


Figure 1. 6 : Flux thermique et chaleur dégagée par les mortiers à partir de 0 %, 5 %, 15 % et 25 % de sédiments calcinés [45].

Par ailleurs, Belguesmia [47], a rapporté que les pâtes contenant des sédiments calcinés peuvent parfois dégager plus de chaleur que les pâtes de ciment pur, en raison de la réaction pouzzolanique entre la métakaolinite des sédiments et la chaux en solution.

Des travaux antérieurs comme Chikouche et al. [48] et Benzerzour et al. [46] ont confirmé que l'activité chimique des sédiments, notamment leur finesse, peut contribuer à une libération supplémentaire de chaleur. Toutefois, les résultats varient selon les types d'adjuvants et les caractéristiques des sédiments utilisés.

1.3.10.3 Résistance à la compression

Laoufi et al. [32] ont étudié le comportement mécanique de mortiers dans lesquels le ciment a été partiellement remplacé par de la vase calcinée issue du barrage de Fergoug, en évaluant trois taux de substitution (10 %, 20 %, et 30 %). La vase a été soumise à trois températures de calcination (750 °C, 850 °C et 950 °C), avant d'être intégrée aux formulations, et des essais de compression ont été effectués sur les éprouvettes obtenues (Figures 1.6).

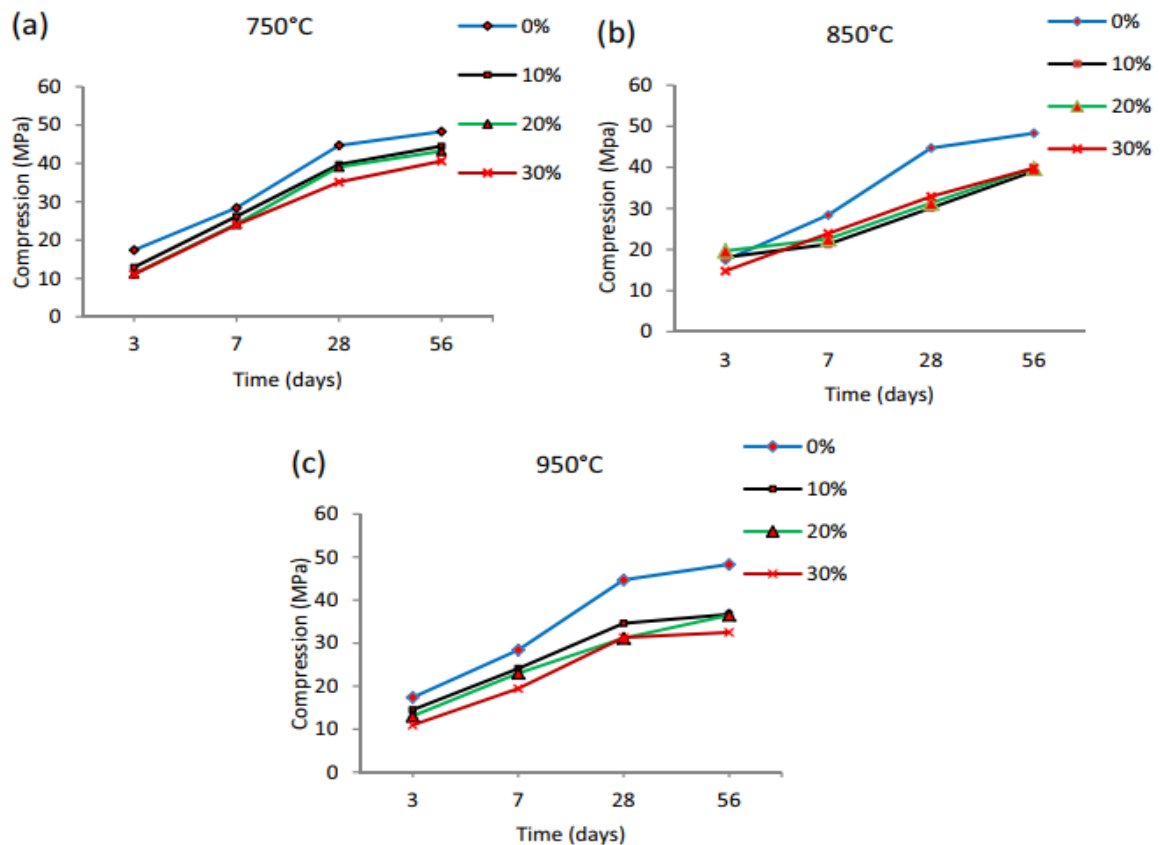


Figure 1. 7 : Résistances à la compression des mortiers à base de vase calcinée à 750, 850 et 950 °C [32].

Ils ont constaté que la résistance à la compression des mortiers incorporant de la vase calcinée augmente avec le temps, même à un taux de substitution du ciment allant jusqu'à 30 %. La meilleure efficacité est observée pour une température de calcination de 750 °C, notamment pour des taux de 10 % et 20 %. Au jeune âge, la réactivité pouzzolanique reste faible, ce qui explique les résistances initiales plus basses. A 56 jours, La température de calcination 850 °C permet d'obtenir des résistances supérieures à celles obtenues à 950 °C, mais inférieures à celles obtenues à 750 °C. Finalement, bien qu'acceptables, les résistances à la compression à 56 jours des mortiers incorporant de la vase calcinée demeurent inférieures à celles du mortier de référence M0.

Selon Belghit et al. [49], les résultats de résistance à la compression des mortiers montrent un écart notable à jeune âge (notamment à 7 jours) entre les formulations à base de vase calcinée et le mortier témoin (Figure 1.8). Toutefois, à partir de 90 jours, les résistances deviennent similaires, avec un écart inférieur à 5 MPa à 180 jours. Le mortier contenant 30 %

de vase (MV30) présente les plus faibles performances et sa résistance cesse d'évoluer au-delà de 90 jours.

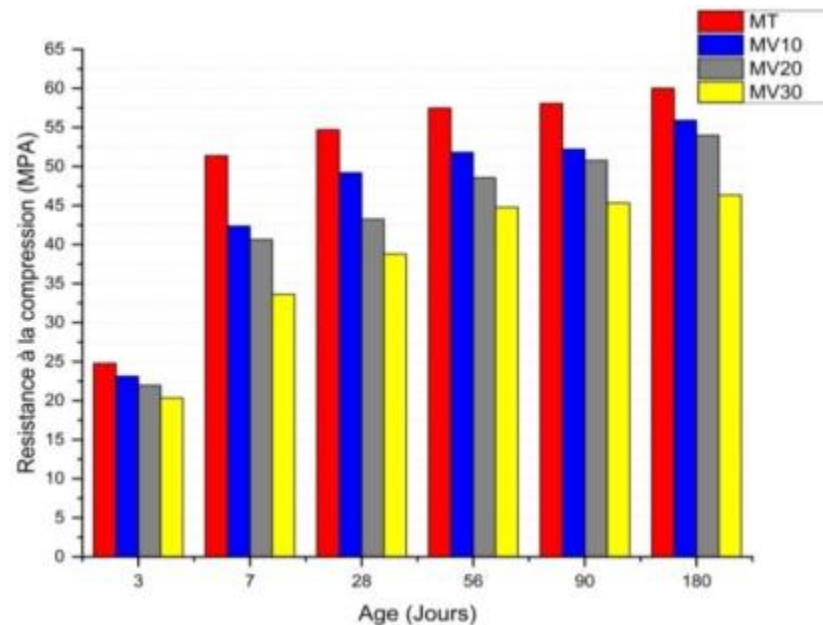


Figure 1. 8 : Résistances à la compression des mortiers à base de vase de barrage de Chorfha calcinée à 750 °C [49].

Belas et al. [50] ont déclaré que La substitution du ciment par une quantité du vase de barrage de Fergoug calcinée à 750 °C provoque une augmentation significative de la résistance à la compression jusqu'à 150 jours de durcissement.

Agostini et al. [37] ont indiqué que l'introduction de sédiments traités en remplacement du sable entraîne une amélioration significative de la résistance à la compression. Un taux de substitution optimal a été observé autour de 33 %, avec une augmentation de la résistance pouvant atteindre 20 %. Ils ont constaté que pour des taux de substitution plus élevés, la résistance à la compression diminue légèrement, mais reste supérieure à celle du mortier de référence.

Dans l'étude réalisée par Benkaddour et al. [51], le pourcentage de substitution de 10% de ciment par des sédiments calcinés dans les mortiers a permis d'obtenir une résistance mécanique similaire à celle du mortier de référence.

L'étude menée par Limeira et al. [52] a évalué l'influence des sédiments marins de dragage (SMD) extraits du port de Sant Carles de la Rápita (Tarragone, Espagne) sur le

comportement des pâtes et des mortiers. Il a été constaté que les mortiers fabriqués avec 25 % de SMD ont une résistance similaire à celle du mortier de référence sans SMD.

1.3.10.4 Résistance à la traction

Laoufi et al. [32] ont étudié la résistance à la traction par flexion de mortiers dans lesquels le ciment a été partiellement remplacé par de la vase calcinée provenant du barrage de Fergoug. Trois taux de substitution ont été évalués (10 %, 20 % et 30 %), et la vase a été calcinée à trois températures différentes (750 °C, 850 °C et 950 °C) (figure 1.8). Leur étude a montré, de manière générale, que l'incorporation de vase calcinée permet d'améliorer la résistance à la flexion des mortiers, quel que soit le taux de substitution.

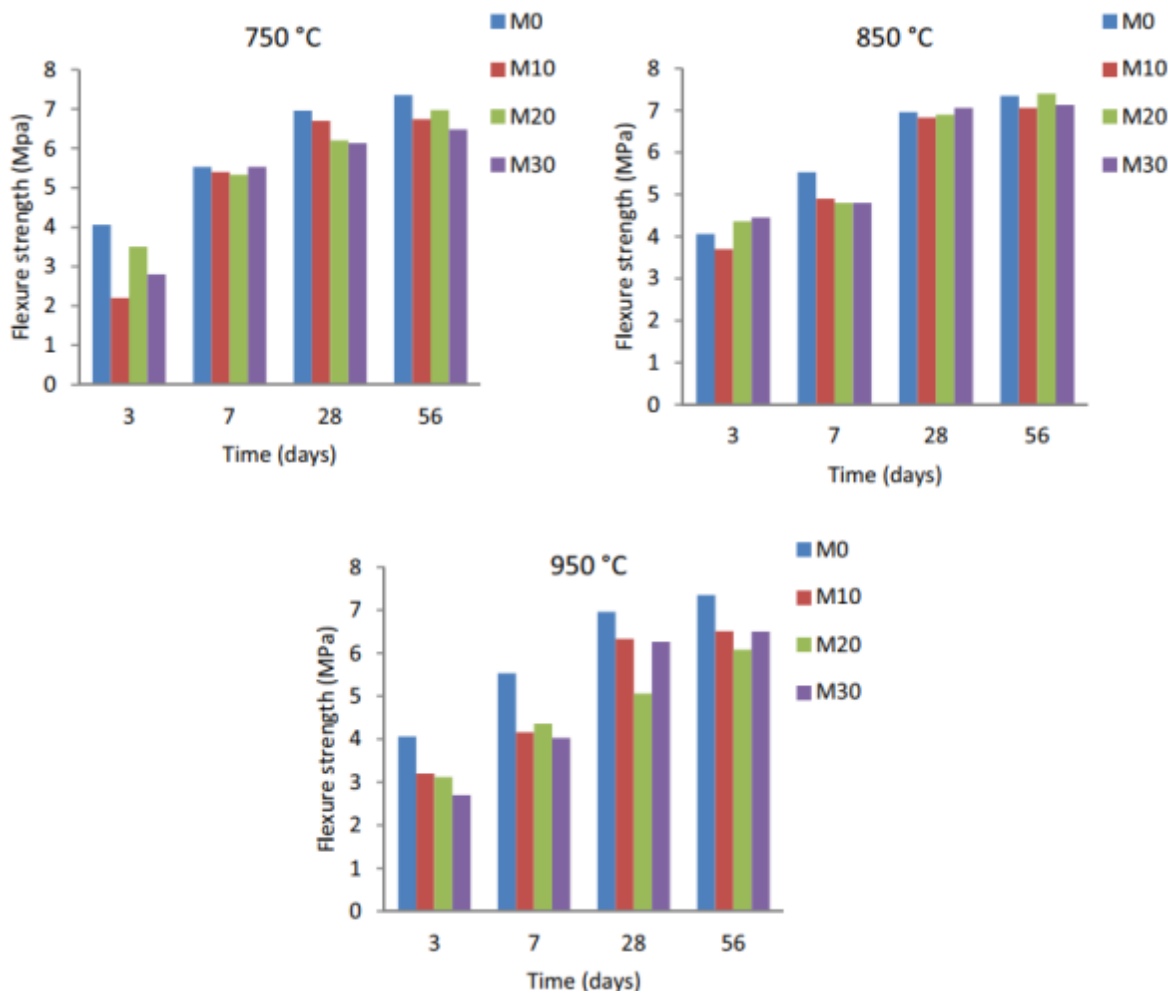


Figure 1. 9 : Résistances à la traction par flexion des mortiers à base de vase calcinée à 750, 850 et 950 °C [32].

1.4 Conclusion

À travers cette synthèse bibliographique, nous avons mis en évidence les aspects physico-chimiques et minéralogiques du ciment Portland et de ses constituants, ainsi que les mécanismes d'hydratation qui gouvernent le développement des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires. L'intégration d'ajouts minéraux tels que le laitier, les cendres volantes, la fumée de silice ou encore les pouzzolanes, permet d'améliorer la durabilité, la compacité et la résistance à long terme du béton, tout en réduisant la consommation de clinker et les émissions de CO₂ associées.

Par ailleurs, la problématique de l'envasement des barrages en Algérie, notamment celui de Sidi Yacoub, offre une opportunité de valorisation de sédiments fins par activation thermique. Les vases draguées, riches en silice et en alumine, présentent un réel potentiel pouzzolanique après calcination, et peuvent être utilisées en substitution partielle du ciment. Les études antérieures ont démontré que, sous certaines conditions de traitement (température de calcination, taux de substitution, finesse), ces sédiments améliorent la microstructure des mortiers et leur performance mécanique à long terme. Cette approche s'inscrit pleinement dans une logique d'économie circulaire et de développement durable, tout en répondant à des enjeux techniques majeurs dans le domaine des matériaux de construction.

***Matériaux et matériel
d'essais***

Chapitre 2 : Matériaux et matériel d'essais

2.1 Introduction

Avant de nous aventurer dans la phase expérimentale, il est impératif de procéder à une analyse approfondie des matériaux utilisés dans la composition des mortiers testés.

Ce chapitre présente en détail les différents matériaux qui sont utilisés dans la production des mortiers testés, tout en mettant en évidence les essais qui seront réalisés en conformité avec les normes internationales.

2.2 Matériaux utilisés

2.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment Portland (CEM I 52.5 N) produit par la cimenterie d'Oued Sly (Chlef) sans ajout de matériaux autres que du clinker. Il présente une densité de 3.15 et une surface spécifique de 3500 cm²/g. Sa résistance à la compression à 28 jours est supérieure à 52.5 MPa. Ses caractéristiques chimiques sont indiquées dans le tableau 2.1.

Tableau 2. 1 : Composition chimique du ciment utilisé.

Composition chimique (%)								
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
64.25	20.20	5.60	3.24	0.84	1.70	0.18	0.77	1.39

2.2.2 Vase de barrage

2.2.2.1 Situation et présentation du site du barrage de Sidi Yacoub

Le Barrage de Sidi Yacoub, l'un des principaux ouvrages hydrauliques du pays, représente un site où les sédiments extraits du dragage peuvent être valorisés, offrant ainsi une solution innovante aux enjeux liés à l'envasement tout en optimisant les ressources disponibles. Ce dernier est un barrage en terre doté d'un noyau étanche en argile (Figure 2.1). Il a été construit entre 1981 et 1986 et mesure 95 mètres de hauteur pour une altitude à la crête

de 272 mètres à Chlef (Algérie). Le barrage dispose de 4 prises d'eau espacées de 8.5 mètres pour une profondeur de vallée similaire à celle de Sidi Yacoub. Il est alimenté par deux cours d'eau, dont le principal est Oued Lardjem, l'un des principaux affluents de la rive gauche du fleuve Chélif. Le barrage peut contenir jusqu'à 280 millions de mètres cubes d'eau, utilisés pour l'irrigation des terres et l'alimentation en eau potable. Le coût initial de construction était de 500 millions de dinars, mais a augmenté de 200 millions de dinars après réévaluation [53].



Figure 2. 1 : Barrage de Sidi Yacoub.

2.2.2.2 Etapes de la préparation de la vase utilisée

La vase du barrage utilisée dans cette étude provient des sédiments accumulés dans les bassins de retenue du barrage de Sidi Yacoub. Ces sédiments sont extraits par dragage, une technique qui consiste à aspirer ou racler les matériaux déposés au fond du bassin (Figure 2.2).



Figure 2. 2 : Extraction de la vase du barrage.

Une fois extraite, la vase a été soumise à un séchage en étuve à une température de 105°C afin d'éliminer toute l'humidité (Figure 2.3). Cette étape est essentielle pour garantir un bon broyage par la suite.



Figure 2. 3 : Vase avant et après séchage.

Après séchage, la vase est broyée pendant cinq heures dans une machine micro-Deval, ce qui permet d'améliorer sa finesse et d'augmenter sa réactivité. Le matériau broyé est ensuite tamisé à 80 μm pour obtenir la granulométrie souhaitée (Figure 2.4).



Figure 2. 4 : Broyage de la vase dans la machine Micro-Deval.

La dernière étape consiste en une calcination, visant à activer la vase en tant qu'ajout pouzzolanique. L'objectif de la calcination de la vase est de la transformer en un ajout pouzzolanique par déshydroxylation des matériaux peu réactifs. En se basant sur les résultats de la recherche bibliographique sur l'optimisation des conditions de traitement thermique de la vase [32, 49], celle-ci est calcinée dans un four à moufle à une température de $750^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ pendant 5 heures (Figure 2.5).

La montée en température est quasi-linéaire, avec une vitesse moyenne d'environ 10°C par minute, jusqu'à atteindre la température cible de 750°C en 80 minutes (Figure 2.6). Le refroidissement rapide permet de favoriser la transformation de la structure cristalline en une structure amorphe. Cette opération donne lieu à la formation du produit pouzzolanique actif. La figure 2.7 montre des photos de la vase avant et après calcination.



Figure 2. 5 : Calcination de la vase à $750\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

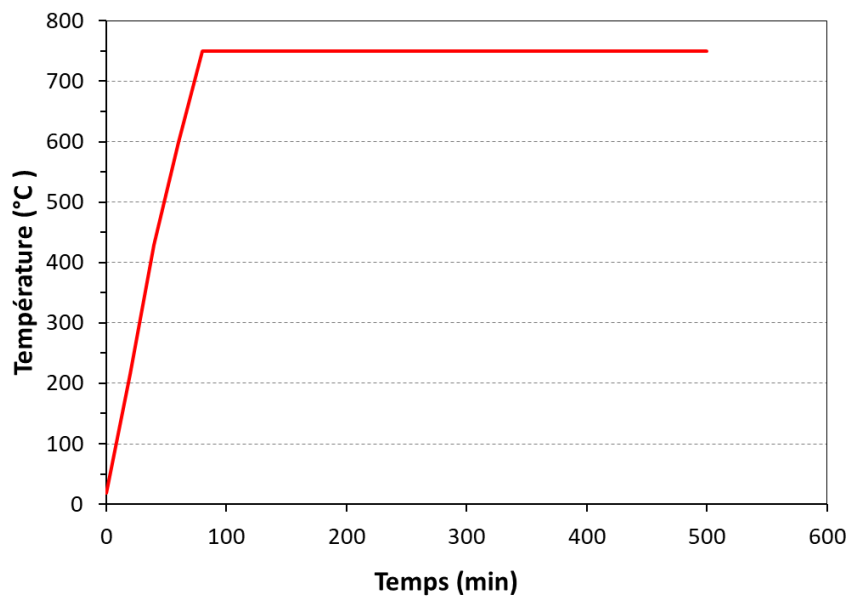


Figure 2. 6 : Evolution de la température du four en fonction du temps.

La vase calcinée présente une densité de 2.70 et une surface spécifique de $5500\text{ cm}^2/\text{g}$.



Figure 2. 7 : Vase avant calcination et après la calcination.

2.2.2.3 Analyse chimique par diffraction aux rayons X (DRX)

L'analyse chimique de la vase brute et calcinée a été réalisée par diffraction aux rayons X. L'analyse par DRX a permis d'identifier les phases minéralogiques présentes dans la vase de barrage avant et après traitement thermique à 750 °C, conformément à la norme ASTM C1365-06.

Le diffractogramme de la vase brute (Figure 2.8) révèle la présence de minéraux cristallins tels que le quartz, majoritaire, ainsi que la kaolinite, la muscovite, l'illite, la calcite et la dolomite. Après calcination, des modifications minéralogiques notables sont observées (Figure 2.9). La kaolinite disparaît presque totalement, signe de sa transformation en une phase amorphe, probablement la métakaolinite, ce qui indique une activation thermique efficace.

Le quartz demeure inchangé, confirmant sa stabilité à haute température. Une légère diminution des pics de calcite traduit le début de la décarbonatation, sans toutefois une transformation complète à cette température. Par ailleurs, les intensités des phyllosilicates tels que la muscovite et l'illite diminuent, traduisant une altération de leur structure cristalline. L'apparition ou l'augmentation de la mullite peut également être liée à des réorganisations thermiques partielles des phases aluminosilicates. Ainsi, le traitement thermique à 750 °C confère à la vase un caractère amorphe favorable à l'activité pouzzolanique, ouvrant la voie à

sa valorisation comme ajout minéral. Les observations obtenues sont cohérentes avec celles mentionnées dans la littérature [32].

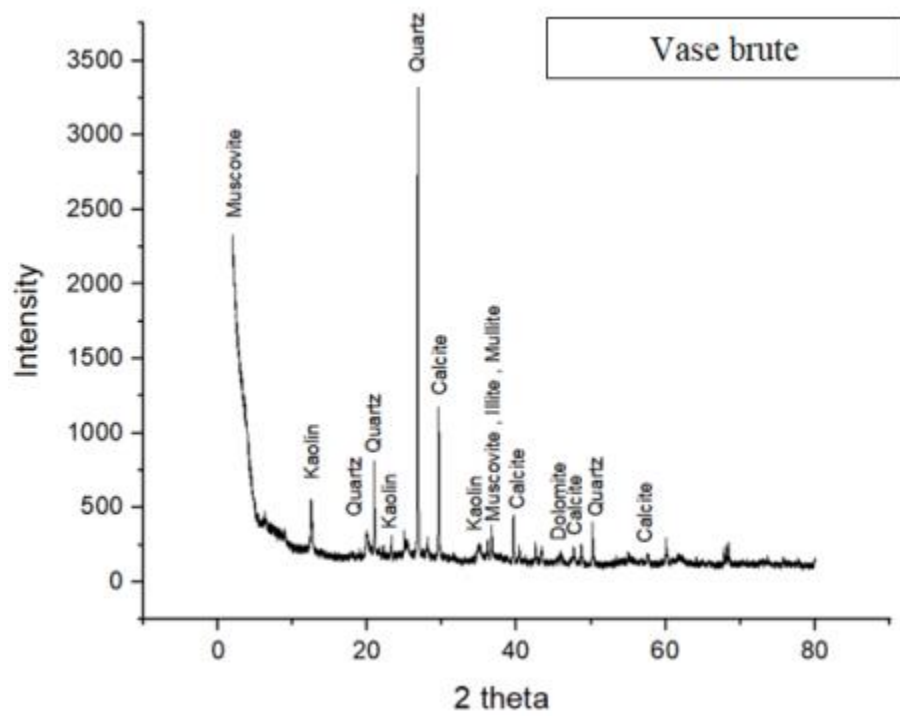


Figure 2. 8 : Diffractogramme des rayons X de la vase brute

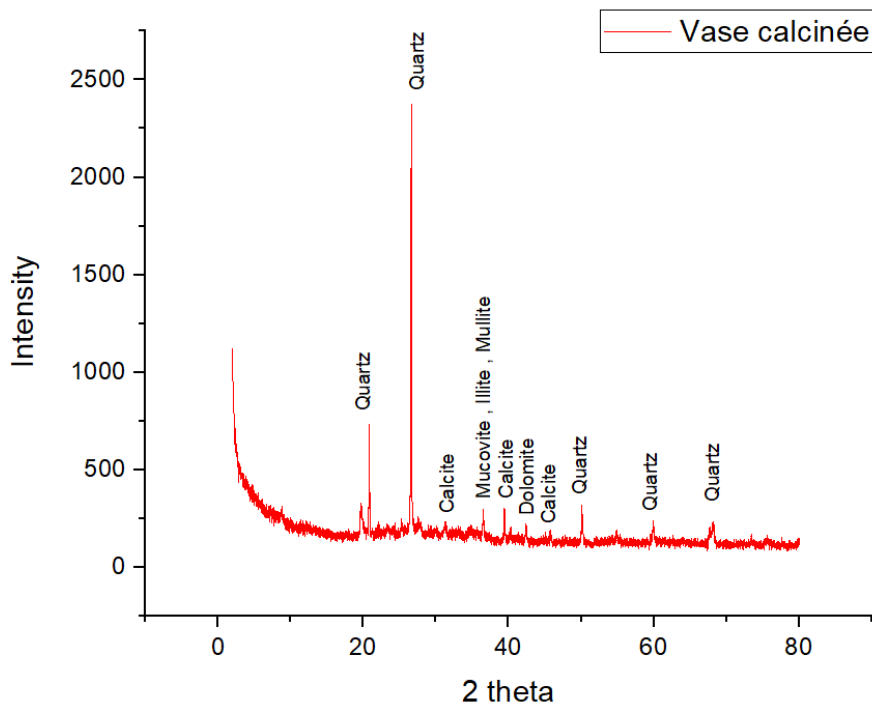


Figure 2. 9 : Diffractogramme des rayons X de la vase calcinée à 750 °C

2.2.2.4 Analyse chimique par fluorescence des Rayons X

La fluorescence X (XRF) est une technique non destructive permettant de quantifier la composition élémentaire d'échantillons solides et liquides. Cet essai a été réalisé au niveau de la cimenterie de Chlef selon la norme EN ISO 12677 (Figure 2.10).



Figure 2. 10 : Essai de fluorescence des Rayons X.

L'analyse XRF des vases calcinées et brutes, dont les résultats sont présentés dans le tableau 2.2, révèle une nette évolution de leur composition chimique suite à la calcination. En effet, on observe une augmentation significative des principaux oxydes, notamment CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 , dans l'échantillon calciné par rapport à la vase brute. Cette hausse est principalement due à la déshydratation et à la décomposition des composés volatils, tels que l'eau et la matière organique, ainsi qu'à la décarbonatation partielle, ce qui concentre les oxydes dans le matériau.

Par ailleurs, la calcination modifie également la structure atomique de la silice présente dans la vase : alors que dans la vase brute la silice est souvent partiellement cristalline et associée à des phases hydratées avec une organisation atomique ordonnée, la calcination provoque une réorganisation de la silice, la rendant plus amorphe, avec une structure atomique désordonnée et non stable.

Tableau 2. 2 : Composition chimique élémentaire du vase brute et calcinée.

Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	SO ₃
Vase brute	8.376	46.546	14.966	6.228	0.537	1.761	1.805	0.240
Vase calciné	9.888	54.522	17.436	7.340	0.619	2.083	2.120	0.292

2.2.3 Eau de gâchage

L'eau utilisée est de l'eau potable, directement prélevée du robinet du laboratoire. Cette eau est exempte d'impuretés susceptibles d'affecter la qualité des mélanges.

2.2.4 Sable

Le sable utilisé pour la confection des éprouvettes en mortier est un sable normalisé conforme à la norme EN 196-1. La courbe granulométrique de ce sable est représentée sur la figure 2.11.

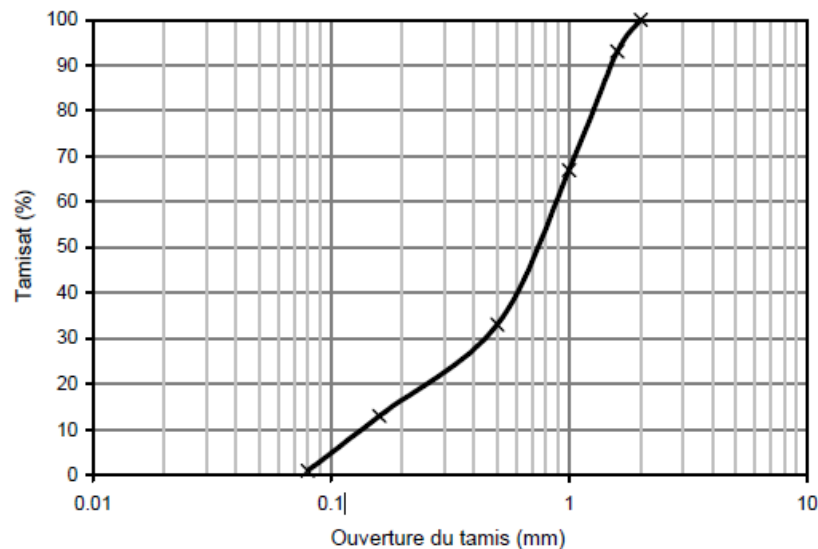


Figure 2. 11 : Courbe granulométrique du sable normalisé.

1.1.1 Formulation des mortiers

Cette étude vise à étudier les propriétés des mortiers à base la vase du barrage de Sidi Yacoub à l'état frais et durci (chaleur d'hydratation, masse volumique, résistance à la compression, résistance à la traction par flexion, retrait total).

Une substitution massique de 0, 10, 20 et 30% du ciment par la vase du barrage calcinée a été étudiée et leur comportement sera comparé avec de comportement du mortier sans vase.

Tous les mélanges ont un le même rapport E/C soit 0.5. La formulation des mortiers étudiés est présentée dans le tableau 2.3.

En raison de leur morphologie spécifique et de leur grande finesse, les particules issues des vases calcinées présentent une surface spécifique élevée, ce qui accroît leur demande en eau et engendre une réduction significative de l'ouvrabilité des mortiers. Cette perte de maniabilité se manifeste également par une altération de la consistance de la pâte. Afin de maintenir des conditions d'essai comparables, tous les mortiers ont été formulés pour atteindre une ouvrabilité équivalente, définie par un étalement normalisé de 140 mm. Pour y parvenir, un plastifiant (Superior 9WG) a été introduit dans le mélange, ce qui permet d'assurer une bonne dispersion des particules, d'améliorer la fluidité de la pâte et de préserver le rapport eau/ciment initial. Cette stratégie permet de garantir l'homogénéité du mortier sans compromettre ses propriétés mécaniques à l'état durci.

Un mortier de référence a été formulé en substituant 20 % du ciment par de la vase brute, dans le but d'évaluer l'indice de réactivité pouzzolanique de cette dernière. Cette approche permet d'établir une base comparative pour quantifier l'effet du traitement thermique sur le comportement de la vase dans une matrice cimentaire. En analysant les performances mécaniques obtenues avec cette substitution, il devient possible d'apprécier la contribution réactive intrinsèque de la vase brute, ainsi que l'amélioration potentielle apportée par la calcination en termes de développement des résistances mécaniques à court et long terme.

Tableau 2. 3 : Composition des mortiers (g).

Mortier	Ciment	Vase calcinée	Vase brute	super Plastifiant	Sable	Eau
M0	450	0	/	0	1350	225
MV10	405	45	/	1.25	1350	225
MV20	360	90	/	1.50	1350	225
MV30	315	135	/	1.75	1350	225
MV20-NC	360	/	90	1.50	1350	225

2.2.5 Préparation des mortiers

Le malaxage du mélange a été effectué par un malaxeur à mortier à axe vertical d'une capacité de 5 litres, comme il est montré sur la figure 2.12. La préparation des mortiers a été effectuée selon la norme EN 196-1 :

- Mettre le ciment et la vase dans une bouteille en verre et malaxer manuellement, afin de rendre le liant à l'état sec homogène.
- Introduire l'eau, en premier, dans la cuve du malaxeur, verser ensuite le liant, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.
- Après 30 s de malaxage, introduire régulièrement le sable pendant les 30 s suivantes.
- Mettre alors le malaxeur à une vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30 s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.



Figure 2. 12 : Malaxeur à mortier.

2.2.6 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes de dimensions 4x4x16 cm doivent être moulées immédiatement après la préparation du mortier. Le mortier est introduit en deux couches successives dans chaque

compartiment du moule, fermement fixé à la table à chocs, directement depuis le récipient de malaxage. La première couche est étalée uniformément à l'aide d'une spatule, en veillant à ce que ses épaulements soient en contact avec la partie supérieure de la hausse, et en tirant la spatule une fois dans chaque direction, c'est-à-dire en avant et en arrière le long de chaque compartiment du moule. Ensuite, la couche est comprimée, nivelée à l'aide de la spatule et consolidée par 60 chocs (Figure 2.13). Après cela, le moule est retiré avec précaution de la table à chocs et la hausse est enlevée. L'excédent de mortier est alors retiré à l'aide d'une règle métallique plate, posée de côté et animée de mouvements lents et transversaux, une fois dans chaque direction. Enfin, la surface des éprouvettes est lissée à l'aide de la même règle, presque à plat. Les moules doivent être étiquetés pour permettre l'identification des éprouvettes ainsi que leur position sur la table à chocs, comme montré à la figure 2.14.

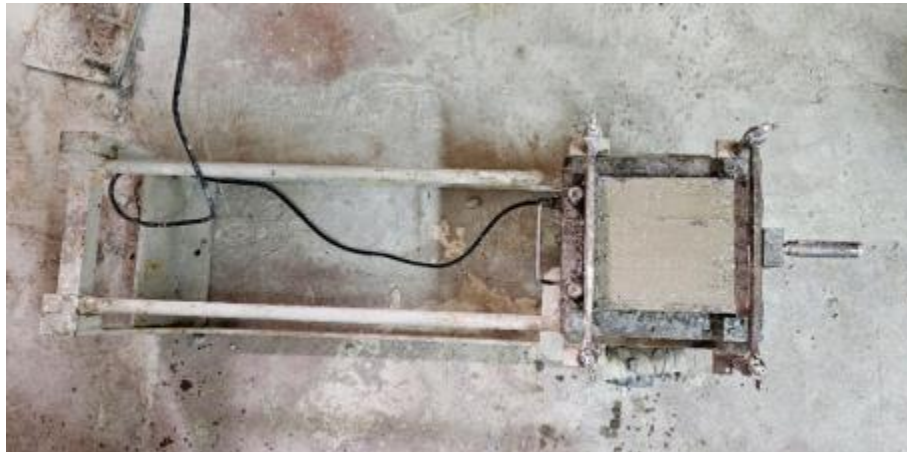


Figure 2. 13 : Serrage des éprouvettes avec la table à choc.



Figure 2. 14 : Moule prismatique.

2.2.7 Conservation des éprouvettes

Après le coulage, les éprouvettes sont immédiatement recouvertes d'une toile de jute humide afin d'empêcher toute évaporation au très jeune âge. Après 24 h, les éprouvettes sont démoulées et conservées dans un bain thermostatique saturé en chaux sous une température de 20 °C jusqu'au jour de l'essai (Figure 2.15).



Figure 2. 15 : Mode de conservation des éprouvettes.

2.3 Essais sur les mortiers frais

2.3.1 Essais d'ouvrabilité

L'essai d'étalement est réalisé par une table à secousses représentée sur la figure 2.16. Le déroulement de cet essai a été réalisé selon la norme ASTM C 1437. L'essai consiste à mettre le mortier frais préparé dans un moule tronconique de diamètre inférieur 100 mm, diamètre supérieur 70 mm et de hauteur 60 mm en deux couches. Ensuite, le moule est retiré et la table vibrante est lâchée 25 fois. La valeur de l'étalement considéré, constitue la moyenne de la mesure de l'étalement de mortier sur deux directions perpendiculaires exprimée en pourcentage du diamètre initial de base de mortier. L'étalement en (%) donné par la formule suivante :

$$\text{Étalement (\%)} = \left(\frac{D_{moy} - D_0}{D_0} \right) \times 100 \quad (6)$$

Où :

D_{moy} : diamètre moyen de base de mortier (mm),

D_0 : diamètre initiale de base de mortier (mm).



Figure 2. 16 : Mesure de l'étalement pour les mortiers à l'état frais.

2.3.2 Prise de ciment

L'essai de la prise du ciment vise à déterminer les temps caractéristiques de début et de fin de prise de la pâte cimentaire. Il a été effectué au sein de la cimenterie de Chlef, en utilisant l'appareil de Vicat automatique, conformément aux prescriptions de la norme européenne EN 196-7 (Figure 2.17).

Le temps de début de prise est défini comme le moment, compté à partir du temps zéro, où la sonde pénètre la pâte jusqu'à une profondeur de 6 ± 3 mm. Quant au temps de fin de prise, il correspond à l'instant où la profondeur de pénétration atteint 0.5 mm, toujours mesurée par rapport au temps initial de malaxage.



Figure 2. 17 : Appareil de Vicat automatique.

2.3.3 Chaleur d'hydratation

L'essai de mesure de la chaleur d'hydratation a été effectué au niveau du laboratoire de la cimenterie ECDE de Chlef.

Nous avons choisi d'utiliser la méthode de la calorimétrie semi-adiabatique appelée essai de la bouteille de Langavant (Figure 2.18) pour les mortiers contenant du vase calciné à 750 °C avec 0%, 10% et 20 % et 30 %. La température du laboratoire où le mortier est gâché est maintenue constante à 20 °C.

2.3.3.1 Composition du mortier

La composition du mortier doit être conforme à la norme EN 196-1 et l'échantillon destiné à l'essai doit avoir une masse totale de 1575 g.

Chaque gâchée doit être constituée de 360 g de ciment, 1080 g de sable normalisé et 180 g d'eau distillée. Comme il n'est pas possible de récupérer la totalité des matériaux versés dans le récipient du malaxeur, il convient que la gâchée soit légèrement supérieure à 1575 g.

2.3.3.2 Malaxage

Conserver le ciment, l'eau, le sable, la boîte à mortier, le récipient du malaxeur et les autres instruments dans la salle d'essais à une température de 20 °C.

Le malaxeur étant dans sa position de fonctionnement, verser le sable pendant 30s à petite vitesse ; verser ensuite l'eau, et malaxer immédiatement à petite vitesse pendant 60 s. Régler le malaxeur sur la grande vitesse et malaxer à nouveau pendant 60 s. Afin d'éviter les

dépense thermiques, il est recommandé d'exécuter le malaxage dans un temps relativement court. C'est pour cette raison que le temps de malaxage prescrit dans la norme EN 196-1 a été raccourci.

2.3.3.3 Mise en place de l'échantillon d'essai

Aussitôt après le malaxage :

- Peser 1575 g de mortier dans la boîte qui a été pesée au préalable, avec son couvercle. Mettre en place le couvercle en s'assurant de l'étanchéité.
- Remplir l'étui pour thermomètre de $2.5 \pm 0,5 \text{ cm}^3$ d'huile (par exemple de l'huile minérale fluide), afin d'améliorer le contact thermique entre l'échantillon d'essai et le thermomètre.
- Peser la boîte à mortier à $\pm 0.5 \text{ g}$ pour pouvoir contrôler, à la fin de l'essai, toute perte de vapeur d'eau éventuelle et introduire le mélange ensuite dans le calorimètre d'essai et le refermer immédiatement avec le bouchon.
- Mettre le thermomètre en place dans l'étui pour thermomètre de manière à ce qu'il soit approximativement au cœur de l'échantillon d'essai. Sceller l'orifice de passage à travers le bouchon au moyen d'un dispositif de fermeture. Le bouchon peut être également obturé au moyen d'un matériau d'étanchéité, malléable, ou de mastic.

Le malaxage et la mise en place de l'échantillon d'essai ne doivent pas prendre plus de 6 min. En fin d'essai, peser à nouveau la boîte à mortier à $\pm 0.5 \text{ g}$. En cas de réduction de masse supérieure à 2 g, l'essai n'est pas valable et doit être recommencé.

2.3.3.4 Mesure de l'échauffement

Le moment où l'on verse de l'eau sera pris comme origine des temps. La mesure de l'échauffement consiste à relever, à des instants déterminés, la température de l'échantillon d'essai et celle de l'échantillon inerte placé dans le calorimètre de référence.

La fréquence des mesures peut être accrue en fonction des caractéristiques du ciment étudié. Consigner l'instant de chaque relevé de température en heures et minutes.

A chaque relevé de température, déterminer l'échauffement de l'échantillon d'essai (h_t) comme la différence entre la température de l'échantillon d'essai (T_s) et celle de l'échantillon inerte (T_{r0}), placé dans le calorimètre de référence.



Figure 2. 18 : Calorimètre de Langavant.

2.4 Essais sur les mortiers durcis

2.4.1 Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion (f_t) est mesurée sur les éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm (Figure 2.19). Cet essai est réalisé conformément à la norme NF EN 196-1.

Les résultats obtenus correspondent à la moyenne des valeurs de trois éprouvettes. La contrainte de flexion est calculée suivant la formule ci-dessous :

$$f_t = \frac{3FL}{2a^3} \quad (7)$$

f_t : résistance à la flexion exprimée en MPa.

F : force de rupture exprimée en N.

L = distance entre les appuis (L = 100 mm)

a = largeur de l'éprouvette (a = 40 mm)



Figure 2. 19 : Appareil de traction par flexion.

2.4.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression des mortiers est effectuée sur les demi-prismes issus de la rupture en flexion des trois éprouvettes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Les demi-prismes sont centrés entre les deux surfaces du dispositif et soumis à un essai de compression sur les côtés de la pièce moulée, comme le montre la figure 2.20. Les essais sont réalisés conformément à la norme NF EN 196-1.

La contrainte de la rupture est calculée suivant la formule ci-dessous :

$$f_c = \frac{F}{S} \quad (8)$$

F : force appliquée sur le demi-prisme.

S : Section de l'éprouvette en mm^2 ($S = 1600 \text{ mm}^2$).



Figure 2. 20 : Essai de compression sur demi-prismes.

2.4.3 Retrait total

L'essai a pour but de déterminer les déformations des bétons sans l'introduction de contraintes mécaniques externes.

Les échantillons ont été coulés dans des moules prismatiques de dimensions 40×40×160 mm. Par la suite, ils ont été recouverts d'une toile de jute humidifiée pour empêcher toute évaporation, puis ils ont été conservés dans le laboratoire à une température constante de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et à une humidité relative de 90 %. Après une période de 24 heures, les échantillons ont été démoulés et enveloppés d'une fine couche d'asphalte, avec un ruban adhésif aux deux extrémités, dans le but de minimiser les effets liés aux bords et d'empêcher tout échange d'humidité avec l'environnement extérieur.

Les échantillons ont été maintenus en position verticale à l'air libre. Les mesures de retrait ont été effectuées à l'aide d'un comparateur de précision $1\text{ }\mu\text{m}$, comme illustré dans la figure 2.21.



Figure 2. 21 : Essai de retrait.

Le retrait est mesuré sur trois intervalles :

- Premier intervalle : une fois par jour pendant la première et la deuxième semaine ;
- Deuxième intervalle : trois fois par semaine pendant la troisième et la quatrième semaine ;
- Troisième intervalle : une fois par semaine pour une période de deux mois.

La variation relative de la longueur provoquée par le retrait est exprimée par :

$$\varepsilon(t) = \Delta L/L \quad (9)$$

ε : Déformation de retrait exprimée en $\mu\text{m}/\text{m}$.

ΔL : variation de longueur exprimée en μm .

L : longueur entre les deux bords de l'éprouvette égale à 160 mm

2.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les matériaux utilisés ainsi que les méthodes de préparation et d'essai des mortiers. L'accent a été mis sur la valorisation de la vase du barrage de Sidi Yacoub comme ajout pouzzolanique après un traitement thermique à 750 °C. Les analyses physico-chimiques ont confirmé l'intérêt de cette transformation, en mettant en évidence l'amélioration de la composition et la réactivité de la vase calcinée.

Les formulations ont été conçues de manière à garantir des conditions d'essais homogènes, en intégrant un superplastifiant pour assurer une ouvrabilité constante. La préparation rigoureuse des mortiers et des éprouvettes, ainsi que leur conservation selon les normes, assurent la fiabilité des résultats expérimentaux.

Ainsi, ce chapitre établit les techniques nécessaires de l'étude des performances mécaniques et durables des mortiers à base de vase, qui seront analysées dans le chapitre suivant.

*Interprétation des résultats
expérimentaux*

Chapitre 3 : Interprétation des résultats expérimentaux

3.1 Introduction

Ce chapitre a pour principal objectif d'approfondir la compréhension des effets de l'incorporation de vase sur les propriétés des mortiers à base de liant cimentaire. Il vise à fournir des données supplémentaires sur le comportement de ces matériaux alternatifs, tant à l'état frais qu'à l'état durci, dans une optique de valorisation de la vase comme ajout minéral.

3.1.1 Propriétés des mortiers à l'état frais

3.1.1.1 Ouvrabilité

Afin de garantir des conditions d'essai comparables, tous les mortiers ont été formulés de manière à présenter une ouvrabilité équivalente, définie par un étalement normalisé du mortier témoin (140 ± 10 mm).

La figure 3.1 montre l'évolution du pourcentage de superplastifiant en fonction du taux de vase présent dans le mélange. Il apparaît clairement que le dosage en superplastifiant augmente progressivement avec l'accroissement du taux de vase. À titre d'exemple, pour une substitution de 30 % par la vase provenant du barrage de Sidi-Yaakoub, un dosage de 0.4 % en superplastifiant (Superior 9WG) est requis afin de conserver la même ouvrabilité du mortier.

Cela s'explique par la nature très fine du vase, riche en particules argileuses, qui augmente la demande en eau du mélange en raison de sa grande surface spécifique et de sa capacité d'absorption. Pour éviter d'augmenter le rapport E/C ce qui nuirait aux performances mécaniques du béton ou mortier il est nécessaire de compenser cette demande en eau par un ajustement du dosage en adjuvants, notamment en superplastifiant. Hadj Sadok et al ont trouvé les mêmes résultats [45].

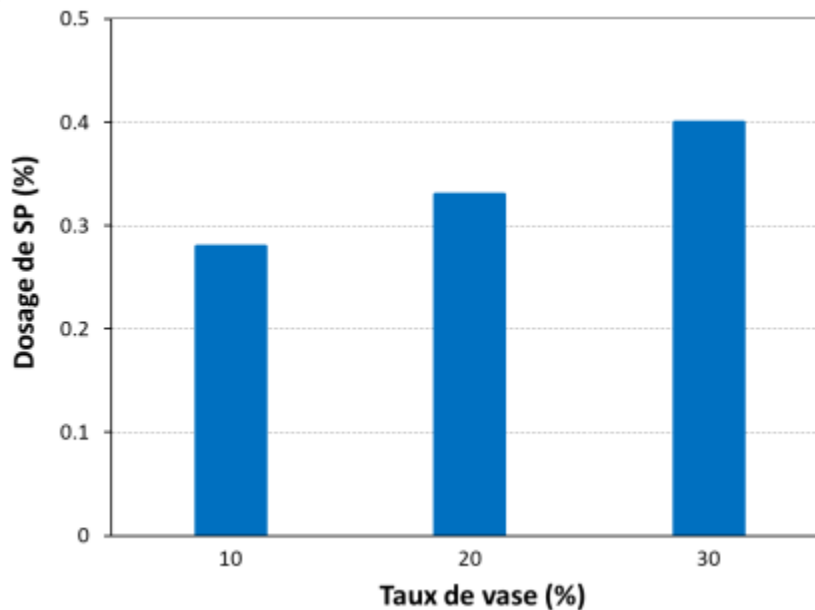


Figure 3. 1 : Variation du dosage de SP en fonction de taux de substitution de la vase.

3.1.1.2 Prise de ciment

La Figure 3.2 illustre l'évolution des temps de début et de fin de prise pour différents types de mortiers (M0, MV10, MV20, MV30), en fonction du taux de vase incorporé. On observe que, plus le taux de vase augmente, plus les temps de début et de fin de prise diminuent.

Le mortier témoin M0 (sans vase) présente le temps de prise le plus grand, avec un début à environ 155 minutes et une fin de 283 minutes. A l'inverse, le mortier MV30 (30 % de vase) montre une prise accélérée, avec un début vers 125 minutes et une fin à environ 188 minutes.

Cette tendance indique que la présence de vase agit comme un accélérateur de prise, réduisant non seulement le temps nécessaire pour que la prise commence, mais encore plus fortement celui nécessaire pour qu'elle se termine. La différence de réduction est particulièrement marquée pour la fin de prise, ce qui suggère que le vase influence de manière plus importante la durée totale de la prise du mortier.

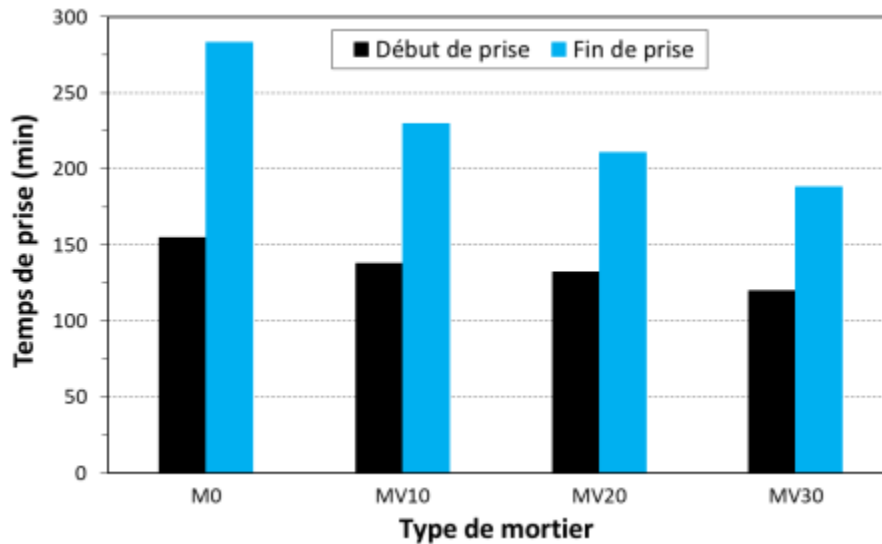


Figure 3. 2 : Début et fin de prise des mortiers.

3.1.2 Propriétés des mortiers à l'état durci

3.1.2.1 Chaleur d'hydratation

La figure 3.3 illustre l'évolution de la quantité de chaleur dégagée (exprimée en J/g) en fonction du temps (en heures) pour différents types de mortiers contenant des proportions variables de vase.

Toutes les courbes montrent une augmentation rapide de la quantité de chaleur pendant les premières heures, suivie d'une stabilisation progressive, indiquant un processus de libération de chaleur rapide au début (ex : hydratation d'un matériau), qui ralentit avec le temps.

L'échantillon M présente la quantité de chaleur la plus élevée, dépassant 320 J/g, ce qui témoigne d'une activité thermique p

lus importante. Ce comportement suggère l'absence d'additif ou de substitution, laissant le liant pleinement réactif. Les formulations à 10 % (MV10) et 20 % (MV20) se situent à un niveau intermédiaire, avec une légère supériorité de MV10 sur MV20 après 20 heures, indiquant que MV10 libère un peu plus de chaleur, tout en restant en dessous de l'échantillon de référence. La diminution de la chaleur d'hydratation observée pour le mortier avec 30 % de vase calcinée s'explique principalement par l'effet de dilution. En effet, à ce taux de substitution, la quantité de clinker réactif (C_3S , C_2S) est significativement réduite, ce qui limite la production de chaleur liée à l'hydratation primaire du ciment. Bien que la vase

calcinée possède une activité pouzzolanique, celle-ci ne suffit pas à compenser entièrement la baisse de réactivité initiale, d'où une chaleur d'hydratation globale plus faible par rapport aux autres formulations. La vase absorbe de l'eau, réduisant la quantité disponible pour l'hydratation du ciment. Cela peut ralentir les réactions d'hydratation, surtout au début. Jiang et al. [54] ont trouvé les mêmes résultats.

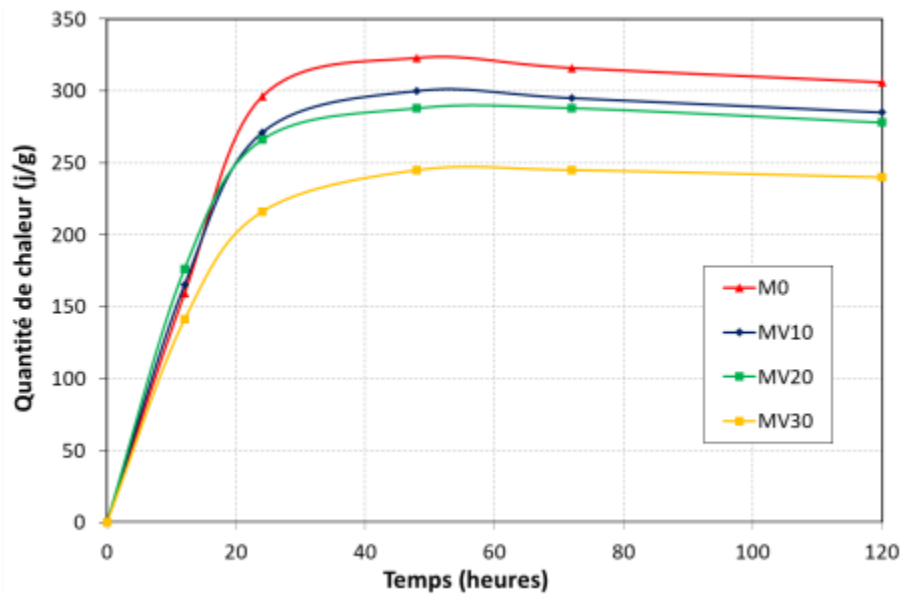


Figure 3. 3 : Chaleur d'hydratation des mortiers.

3.1.2.2 Masse volumique

La figure 3.4 montre l'évolution de la masse volumique (kg/m^3) des mortiers durcis en fonction du taux de vase. On observe une diminution progressive de la masse volumique à mesure que le pourcentage de vase augmente. Le mortier M0 présente la masse volumique la plus élevée (2.26 g/cm^3). En revanche, les MV10, MV20 et MV30 affichent des masses volumiques plus faibles, atteignant environ 2.18 g/cm^3 pour le MV30.

Cette baisse s'explique principalement par la faible densité de la vase, sa nature fine et potentiellement poreuse, qui induit une augmentation de la porosité globale du mortier. Ainsi, l'ajout de vase contribue à l'allègement du matériau, ce qui peut être avantageux pour certaines applications, notamment en construction légère ou en amélioration thermique.

L'ajout de vase dans les formulations de mortiers influence significativement la masse volumique du matériau, et ce, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la vase est constituée majoritairement de particules fines, d'origines organiques et minérales, souvent poreuses et

caractérisées par une faible densité par rapport au ciment. Cette nature physique contribue directement à la réduction de la densité globale du mélange lorsqu'elle est incorporée en substitution partielle des constituants. Ensuite, la vase peut contenir de l'humidité résiduelle et des matières organiques susceptibles de générer des microcavités au sein de la matrice, accentuant ainsi la porosité du mortier. Enfin, l'augmentation progressive de la teneur en vase modifie la microstructure du matériau, en induisant une structure plus poreuse et moins compacte. Cette évolution structurelle se traduit par un allègement du mortier, ce qui peut être recherché dans certaines applications, notamment pour améliorer les performances thermiques ou réduire la charge structurelle.

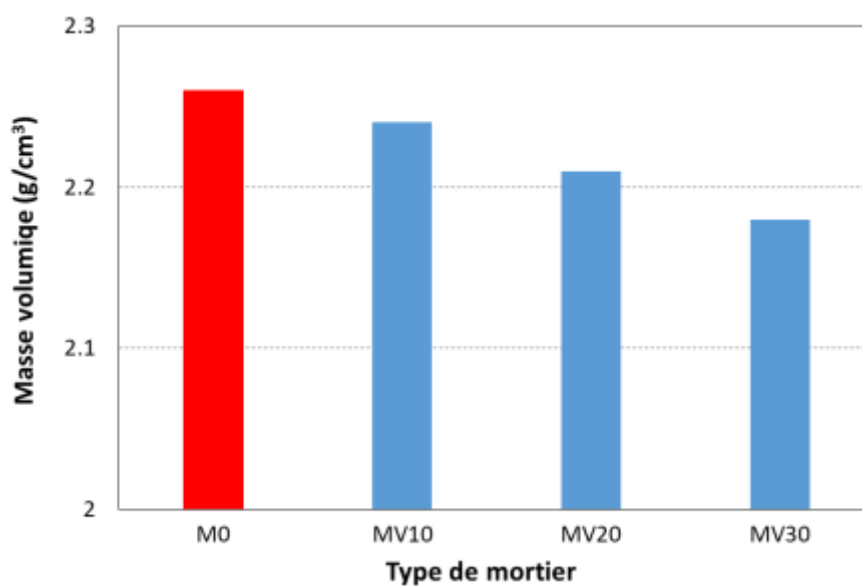


Figure 3. 4 : Masse volumique des mortiers durcis.

3.1.2.3 Indice d'activité pouzzolanique de la vase

D'après Donatello et al. [55], l'indice d'activité pouzzolanique (IAP) est basé sur le fait qu'un mortier de ciment composé de 20% d'un ajout pouzzolanique peut développer 75% de sa résistance à la compression par rapport à un mortier de référence (témoin) au bout 28 jours de durcissement.

Selon la norme ASTM C618, un ajout pouzzolanique est considéré comme efficace s'il permet d'atteindre un certain pourcentage (souvent 75 %) de la résistance du mortier de référence à 28 jours. L'indice d'activité IAP est calculé selon la formule suivante :

$$IAP = \frac{R_{ct}}{R_c} \quad (10)$$

Où : R_{ct} est la résistance à la compression du mortier contenant l'ajout pouzzolanique ;

R_c : Résistance à la compression du mortier de référence (sans ajout).

La figure 3.5 illustre l'évolution de l'indice d'activité pouzzolanique (IAP) des mortiers contenant 20 % de vase, sous forme calcinée (MV20) et brute (MV20-NC), à 28 et 90 jours. Il ressort clairement que le mortier contenant du vase calciné présente un indice supérieur à 75 % dès 28 jours, ce qui satisfait aux exigences des normes en vigueur (notamment ASTM C618) pour être considéré comme un ajout pouzzolanique actif. Cette valeur atteint plus de 85 % à 90 jours, traduisant une amélioration progressive de l'activité pouzzolanique avec le temps, attribuée à la réactivité élevée des composés amorphes générés par la calcination. En revanche, le mortier à base de vase non calciné affiche des indices nettement inférieurs (environ 53 % à 28 jours et 65 % à 90 jours), indiquant une activité pouzzolanique limitée. Cela s'explique par la faible réactivité des phases cristallines présentes dans le vase brut, qui ne permettent pas une interaction suffisante avec les produits d'hydratation du ciment. Ces résultats confirment l'importance du traitement thermique pour activer le potentiel pouzzolanique des vases.

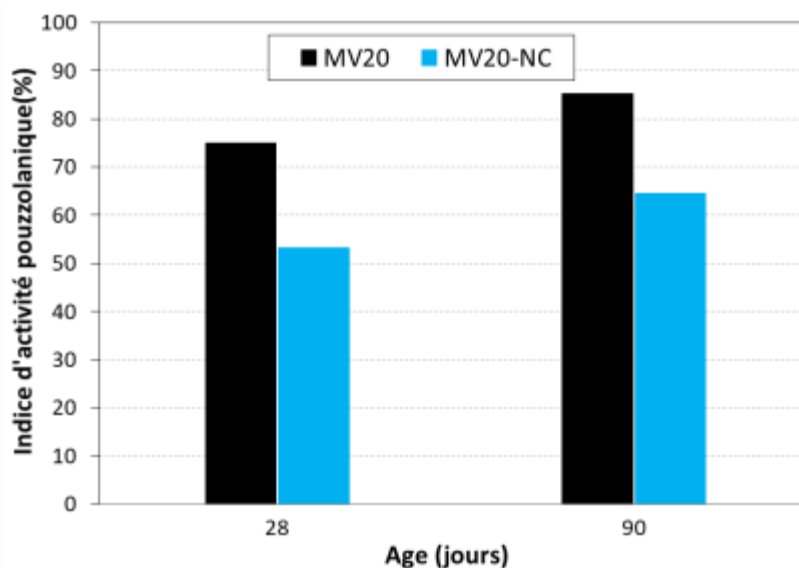


Figure 3. 5 : Indice d'activité pouzzolanique de la vase calcinée et brute.

3.1.2.4 Résistance à la compression

La figure 3.6 présente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de leur âge de durcissement (2, 7, 28, 56 et 90 jours). On observe que pour toutes les compositions, la résistance à la compression augmente avec le temps, ce qui reflète l'évolution normale du processus d'hydratation du liant cimentaire

A court terme (2 et 7 jours), le mortier M0 montre la résistance la plus élevée, suivi par MV10, MV20 puis MV30, indiquant que l'introduction de vase ralentit le développement

initial de la résistance. A 28 et 56 jours, cette tendance persiste bien que les écarts se réduisent progressivement, notamment pour MV10 et MV20.

A 90 jours, une amélioration notable est observée pour MV10, qui atteint une résistance supérieure à celle du mortier de référence M0, traduisant un effet pouzzolanique bénéfique de la vase à ce taux d'incorporation. En revanche, MV20 et surtout MV30 conservent des résistances inférieures, bien qu'elles continuent d'augmenter avec le temps.

Ces résultats montrent que l'ajout de vase peut être bénéfique à condition d'en limiter la teneur. Une substitution de 10 % permet de maintenir, voire d'améliorer, la résistance mécanique à long terme, tandis que des dosages plus élevés (20 % et 30 %) entraînent une diminution significative des performances mécaniques, notamment aux jeunes âges. Ces conclusions sont en accord avec les travaux de Gonçalves et al. [56].

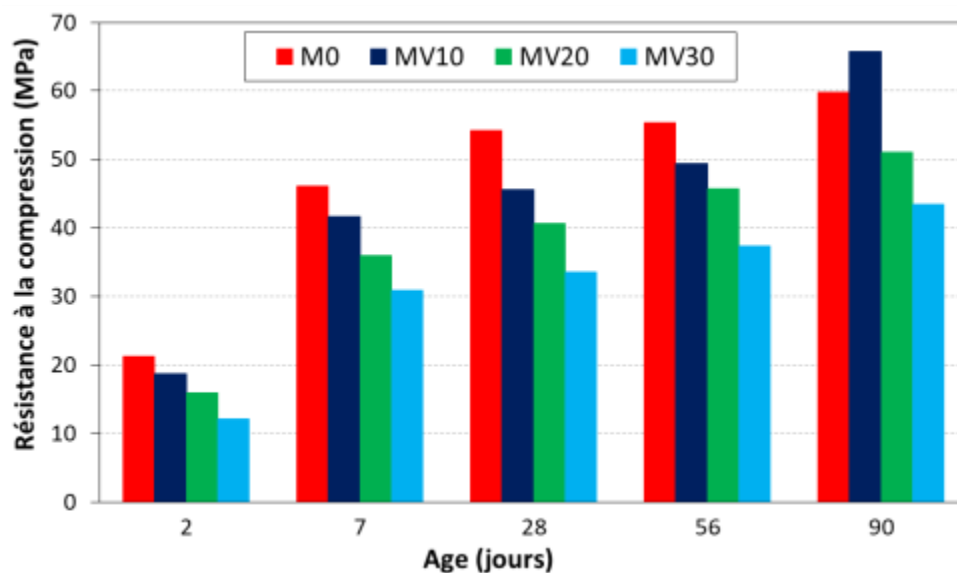


Figure 3. 6 : Résistance à la compression des mortiers.

3.1.2.5 Résistance à la traction par flexion

La figure 3.7 illustre l'évolution de la résistance à la flexion de testés mesurée à différents âges (2, 7, 28, 56 et 90 jours). On observe que la résistance à la flexion augmente avec le temps pour l'ensemble des formulations, ce qui est cohérent avec l'évolution des propriétés mécaniques des mortiers, dues à l'hydratation progressive du ciment.

En revanche, l'introduction de vase dans la formulation du mortier (entraîne une diminution progressive de la résistance à la flexion. Cette baisse est d'autant plus marquée

que le pourcentage de vase est élevé, avec MV30 affichant les valeurs les plus faibles à toutes les étapes. Cependant, il est intéressant de noter que le mortier MV10 se rapproche des performances du mortier de référence M0, notamment à partir de 28 jours, ce qui suggère qu'un faible taux de vase peut être toléré sans altérer de manière significative les propriétés mécaniques à long terme. Ces résultats corroborent ceux présentés par Laoufi et al [32].

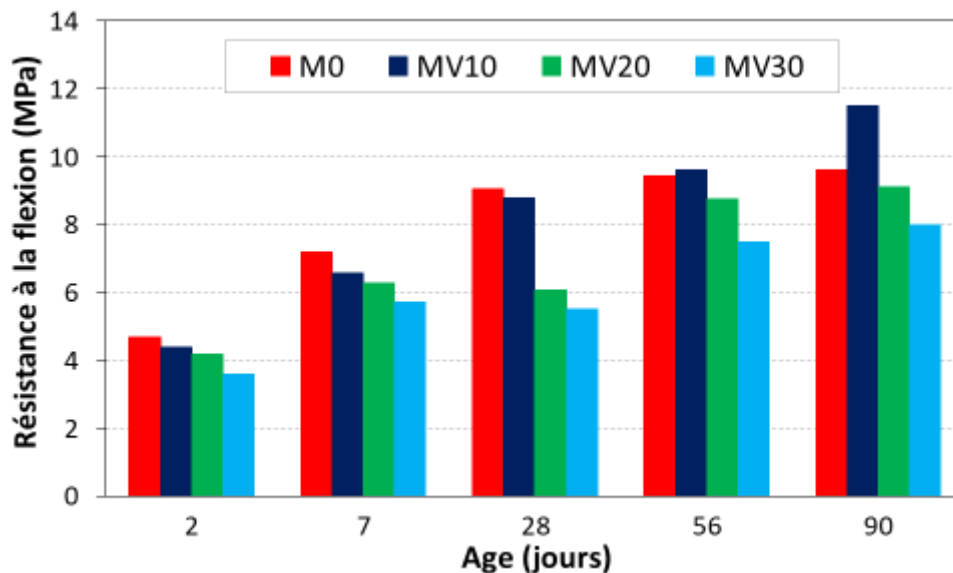


Figure 3. 7 : Résistance à la flexion des mortiers.

3.1.2.6 Retrait total

La figure 3.8 illustre l'évolution du retrait total en fonction de l'âge du mortier exposé à l'aire libre et mesuré jusqu'à 90 jours.

On y observe une augmentation rapide du retrait durant les premiers 14 jours, suivie d'un ralentissement progressif jusqu'à 90 jours. Ce comportement est typique des mortiers de ciment, où le retrait est principalement dû à l'évaporation de l'eau interne. Le mortier de référence M0 présente le retrait le plus faible (environ 880 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 90 jours), traduisant une bonne stabilité dimensionnelle.

En revanche, les mortiers contenant de la vase calcinée montrent un retrait plus élevé, en particulier le mortier MV20, qui atteint environ 1200 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 90 jours. Cette augmentation du retrait est attribuée à la grande finesse de la vase calcinée, qui entraîne une surface spécifique plus importante et donc une plus grande absorption d'eau, favorisant le dessèchement et le retrait ultérieur.

Le mortier MV30, bien que contenant une plus grande quantité de vase, présente un retrait légèrement inférieur à MV20. Cela pourrait s'expliquer par une saturation de la réaction pouzzolanique ou une meilleure structuration de la matrice, réduisant ainsi les déformations. Ces résultats montrent que l'utilisation de la vase calcinée comme ajout cimentaire nécessite un dosage maîtrisé afin d'équilibrer la déformation de retrait.

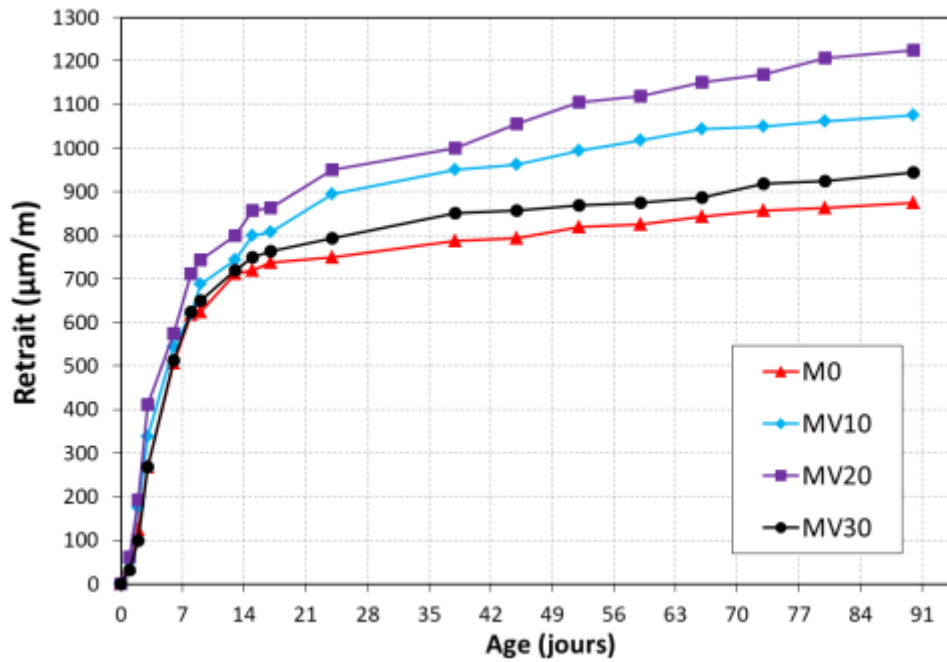


Figure 3. 8 : Retrait total des mortiers.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a porté sur la valorisation de la vase extraite du barrage de Sidi Yacoub comme ajout cimentaire partiel dans la fabrication de mortiers. La vase a été traitée thermiquement à 750 °C afin de la rendre active, puis introduite dans des mortiers à des taux de substitution de 0 %, 10 %, 20 % et 30 % du ciment. Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

Analyse chimique de la vase :

L'analyse par fluorescence et diffraction des rayons X montre qu'après calcination à 750 °C, la vase subit une transformation minéralogique marquée, avec disparition de la kaolinite et augmentation des oxydes majeurs, traduisant une activation pouzzolanique efficace.

Propriétés des mortiers à l'état frais :

1. Le dosage en superplastifiant augmente avec le taux de vase pour maintenir l'ouvrabilité du mortier. Par exemple, 30 % de vase nécessitent 0,4 % de superplastifiant.
2. Le temps de prise du ciment est légèrement réduit avec l'augmentation du taux de vase, en raison de l'activation pouzzolanique de la vase calcinée, qui accélère les réactions d'hydratation et consomme plus rapidement l'eau disponible.

Propriétés des mortiers à l'état durci :

1. La chaleur d'hydratation diminue légèrement avec l'augmentation du taux de vase, traduisant un ralentissement initial des réactions d'hydratation, mais permettant un développement progressif des propriétés mécaniques.
2. La masse volumique durci reste relativement stable mais tend à diminuer légèrement avec l'augmentation du taux de vase, en raison de la moindre densité de la vase par rapport au ciment
3. La vase calcinée montre un indice d'activation de plus de 75 % à 28 jours et dépasse 85 % à 90 jours, contre seulement 53 % et 65 % pour la vase brute. Cette nette amélioration confirme l'effet bénéfique de la calcination. Le traitement thermique est donc essentiel pour activer le potentiel pouzzolanique de la vase.

4. L'ajout de vase calcinée améliore les résistances mécaniques à moyen et long terme, notamment pour un taux de 10 %, qui a présenté les meilleures performances en compression et en traction.
5. Le retrait du mortier augmente légèrement avec l'élévation du taux de vase, en raison de la forte teneur en fines et de la demande en eau des particules calcinées, ce qui entraîne une perte d'eau plus importante lors du séchage.

Aspect environnemental et durable :

1. L'utilisation de la vase permet de réduire la quantité de ciment utilisée, contribuant ainsi à limiter les émissions de CO₂ liées à la fabrication du clinker.
2. Cette valorisation participe à la gestion des sédiments des barrages, en transformant un déchet hydraulique en ressource constructive.
3. Le recours à un matériau local réduit les coûts de production et s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire.

L'ensemble des résultats obtenus montre que la vase calcinée peut être considérée comme un ajout cimentaire efficace et durable, à condition de maîtriser son taux d'incorporation. Un taux de 10 à 20 % semble être un compromis optimal entre performances mécaniques, ouvrabilité et maîtrise du retrait.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Halstead P. The early history of Portland cement. *Transactions of the Newcomen Society*. 1961;34(1):37-54.
- [2] Venuat M. La pratique des ciments-mortiers et bétons. Tome 1: Caractéristiques des liants et des bétons, mise en oeuvre des coulis et mortiers. Collection Moniteur. 1989.
- [3] Winnefeld F, Martin LH, Müller CJ, Lothenbach B. Using gypsum to control hydration kinetics of CSA cements. *Construction and Building Materials*. 2017;155:154-63.
- [4] Dreux G, Festa J. Nouveau guide du béton et de ses constitutants: Eyrolles; 1998.
- [5] Chaid R. Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux: Alger, Ecole Nationale Polytechnique; 2006.
- [6] Regourd M. Microanalytical studies (X-ray photoelectron spectrometry) of surface hydration reactions of cement compounds. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1983;310(1511):85-92.
- [7] Nagrockienė D, Girskas G, Skripkiūnas G. Properties of concrete modified with mineral additives. *Construction and Building Materials*. 2017;135:37-42.
- [8] Wang D, Shi C, Farzadnia N, Shi Z, Jia H. A review on effects of limestone powder on the properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 2018;192:153-66.
- [9] Boubekeur T. Evaluation des performances des ciments portland au calcaire.: Exemple de la cimentaire de chlef: Thèse de Magistère, Université de Chlef; 2009.
- [10] Golewski GL. The role of pozzolanic activity of siliceous fly ash in the formation of the structure of sustainable cementitious composites. *Sustainable Chemistry*. 2022;3(4):520-34.
- [11] Husson S. Étude physicochimique et mécanique des interactions ciment-fillers. Application aux mortiers: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; 1991.
- [12] Belabbas O, Bouziadi F, Boulekbache B, Hamrat M, Haddi A, Amziane S. Mechanical properties of multi-recycled coarse aggregate concrete, with particular emphasis on experimental and numerical assessment of shrinkage at different curing temperatures. *Journal of Building Engineering*. 2024;89:109333.
- [13] Massazza F. Properties and applications of natural pozzolanas. *Structure and performance of cements*. 2002:326-52.
- [14] Nadjet B. Effet des ajouts minéraux sur le comportement mécanique d'un béton autoplaçant: Thèse de doctorat, Université de Bordj Bouarridj; 2016.
- [15] Singh M, Siddique R. Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. *Resources, conservation and recycling*. 2013;72:20-32.
- [16] Bayraktar OY, Saglam-Citoglu G, Belgin CM, Cetin S, Cetin M. Investigation of effect of brick dust and silica fume on the properties of portland cement mortar. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2019;28(11):7823-32.
- [17] Juenger MC, Snellings R, Bernal SA. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*. 2019;122:257-73.
- [18] Zejak R, Nikolić I, Blečić D, Radmilović V, Radmilović VR. Mechanical and microstructural properties of the fly-ash-based geopolymer paste and mortar. *Materiali in tehnologije*. 2013;47(4):535-40.
- [19] Mardani-Aghabaglou A, Sezer GI, Ramyar K. Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials*. 2014;70:17-25.

- [20] Rashad AM. Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition– A comprehensive overview. *Construction and Building Materials*. 2013;41:303-18.
- [21] La Violette N, Fournier D, Dumont P, Mailhot Y. Caractérisation des communautés de poissons et développement d'un indice d'intégrité biotique pour le fleuve Saint-Laurent, 1995-1997. 2003.
- [22] Taieb F. Contribution à l'étude du retrait des mortiers de béton autoplaçant équivalent à base de sédiments de dragage. Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem 2019.
- [23] Grosdemange D. Guide pour la gestion des opérations de dragage. Fédération Française des Port de Plaisance. 2005.
- [24] Benasla M, Benamara L, Hadjel M. Caractérisation de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda et valorisation en tant que matériau de construction (Characterization of dredging mud dam Oued Fodda and valorization as a building material). *J Mater Environ Sci*. 2015;6(2):546-58.
- [25] Labiod Z, Remini B, Belaredj M. Traitement de la vase du barrage de Bouhanifia en vue de sa valorisation. *Larhyss Journal*. 2004;3(1):7-12.
- [26] Rebischung F. Fiches de bonnes pratiques pour l'évaluation et la limitation des impacts sur la qualité physico-chimique des milieux aquatiques lors des opérations de dragage de sédiments continentaux. Version finale: INERIS; 2012.
- [27] Semcha A. Valorisation des sédiments de dragage: Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug: Reims; 2006.
- [28] Dubois V, Abriak NE, Zentar R, Ballivy G. The use of marine sediments as a pavement base material. *Waste management*. 2009;29(2):774-82.
- [29] Levacher D, Sanchez M, Duan Z, Le Guern C. Propriétés physiques et hydrauliques de sédiments marins en vue de réutilisation en remblais. Xèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, Sophia Antipolis. 2008:14-6.
- [30] Hamer K, Karius V. Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment. *Waste management*. 2002;22(5):521-30.
- [31] Kazi Aoual-Benslafa F, Kerdal D, Mekerta B, Semcha A. The use of dredged sediments as sand in the mortars for tunnel lining and for environmental protection. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2014;39:2483-93.
- [32] Laoufi L, Senhadji Y, Benazzouk A. Valorization of mud from Fergoug dam in manufacturing mortars. *Case studies in construction materials*. 2016;5:26-38.
- [33] Safer O, Belas N, Belaribi O, Belguesmia K, Mebrouki A, Hamadache M. Study of the behavior in the fresh and hardened state of an eco-concrete based on dredged sediments. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 2017;8(6):2026-33.
- [34] Aoual-Benslafa FK, Ameer M, Mekerta B, Semcha A. Caractérisation des sédiments de dragage du barrage de Bouhanifia pour une réutilisation. XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, P CFL, Editor Dunkerque. 2014.
- [35] Sannier L, Lavacher D, Jourdan M. Approche économique et validation de méthodes de traitements aux liants hydrauliques de sédiments marins contaminés. *Revue Paralia*. 2009;2:s2. 1–s2. 15.
- [36] Millrath K, Kozlova S, Meyer C, Shimanovich S. New Approach to Treating the Soft Clay/Silt Fraction of Dredged Material. *Dredging'02: Key Technologies for Global Prosperity* 2002. p. 1-10.
- [37] Agostini F, Skoczylas F, Lafhaj Z. About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment. *Cement and Concrete Composites*. 2007;29(4):270-8.
- [38] Azrar H, Zentar R, Abriak N-E. The effect of granulation time of the pan granulation on the characteristics of the aggregates containing Dunkirk sediments. *Procedia Engineering*. 2016;143:10-7.

- [39] Aoual-Benslafa FK, Kerdal D, Ameer M, Mekerta B, Semcha A. Durability of mortars made with dredged sediments. *Procedia Engineering*. 2015;118:240-50.
- [40] Allal L, Ammari M, Azmani A, Belmokhtar N. Caractérisation et valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc). *Revue Paralia*. 2011;4:5.1-5.13.
- [41] Maher A, Bennert T, Jafari F, Douglas W, Gucunski N. Geotechnical properties of stabilized dredged material from New York-New Jersey Harbor. *Transportation research record*. 2004;1874(1):86-96.
- [42] Limeira J, Etxeberria M, Agulló L, Molina D. Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand. *Construction and Building Materials*. 2011;25(11):4165-74.
- [43] Aoual-Benslafa FK, Ameer M, Mekerta B, Semcha A. L'envasement du barrage de Bouhanifia: dragage et valorisation des sédiments. *Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime-Coastal and Maritime Mediterranean Conference2015*.
- [44] ASTM C618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. 2003.
- [45] Sadok RH, Belas N, Tahlaiti M, Mazouzi R. Reusing calcined sediments from Chorfa II dam as partial replacement of cement for sustainable mortar production. *Journal of Building Engineering*. 2021;40:102273.
- [46] Benzerzour M, Amar M, Abriak N-E. New experimental approach of the reuse of dredged sediments in a cement matrix by physical and heat treatment. *Construction and Building Materials*. 2017;140:432-44.
- [47] Belguesmia K. Optimization of an eco-SCC based on dredged sediments with respect to fresh, hardened and durability: Thesis, Mostaganem, Algeria.(In French); 2018.
- [48] Chikouche MA, Ghorbel E, Bibi M. The possibility of using dredging sludge in manufacturing cements: Optimization of heat treatment cycle and ratio replacement. *Construction and Building Materials*. 2016;106:330-41.
- [49] Belghit A, Bouhamou NE, Hamadache M, Ziregue B. La Vase Calcinée des Barrages autant qu'addition substituable partiellement au ciment: comportement vis-à-vis de l'Attaque de l'Acide Chloridrique. *Journal of Materials and Engineering Structures* 2022;9(2): 173 – 85.
- [50] Belas N, Belaribi O, Aggoun S, Bendani K, Bouhamou N-E, Mebrouki A. Enhancing the value of dam dredged sediments as a component of a self compacting concrete. *Cem Wapno Beton*. 2014;6:370-5.
- [51] Benkaddour M, Aoual FK, Semcha A. Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle. *Nature & Technology*. 2009(1):63.
- [52] Limeira J, Agullo L, Etxeberria M. Dredged marine sand in concrete: An experimental section of a harbor pavement. *Construction and Building Materials*. 2010;24(6):863-70.
- [53] Remini B, Bensafia D, Mekhatri A. Le barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda (Algérie): l'envasement s'accélère! *Larhyss Journal*. 2018;33:221-52.
- [54] Jiang S, Van Damme H. Influence de fillers de nature différente sur l'hydratation et la texture des pâtes de C3S. Université d'Orléan, CNRS, rapport CRMD-ATILH. 1996.
- [55] Donatello S, Tyrer M, Cheeseman C. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*. 2010;32(2):121-7.
- [56] Gonçalves J, Tavares L, Toledo Filho RD, Fairbairn E. Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick. *Construction and Building Materials*. 2009;23(5):1971-9.