



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie Département Génie civil Mémoire

Mémoire

En vue de l'obtention du **diplôme de Master**

Filière : **Génie civil**

Spécialité : **Matériaux de construction en génie civil**

Thème

***Innovation dans la Construction : Utilisation
de Géodéchets pour Améliorer la Durabilité
et Réduire les Coûts du Béton***

Présenté par :

LAHLOU Akrem Abdelmalek

Encadré par :

Dr. BELKADI Ahmed Abdelraouf

Dr. RAHMANI Samra

Dr. KESSEL Oussama

Promotion 2023 / 2024

Remercîment

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Je souhaite tout d'abord remercier chaleureusement mon directeur de recherche, Docteur BELKADI Ahmed Abdelraouf, pour ses précieux conseils, son soutien constant et sa disponibilité sans faille. Ses orientations avisées et son expertise ont grandement enrichi ce travail.

Un grand merci également à Dr. RAHMANI Samra, pour son accompagnement bienveillant, ses suggestions pertinentes et ses encouragements qui m'ont permis de progresser tout au long de ce projet.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers tous les professeurs et membres du département qui ont contribué au succès de ce projet et à mon parcours académique en général.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes parents, ma chère famille pour leur soutien constant et leur encouragement tout au long de mon parcours académique, Leur soutien moral et financier a été crucial pour mon succès dans cette aventure académique.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers tous mes amis dans le département avec qui j'ai partagé quatre années d'études. Notre parcours ensemble a été rempli de défis et de précieux souvenirs.

Merci du fond du cœur pour tout.

Dédicace

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices sans fin. Vous êtes ma source d'inspiration et ma force motrice.

À mes professeurs, pour leur expertise, leurs conseils avisés et leur patience. Leur mentorat a enrichi mon parcours académique de manière significative.

À mes amis, pour leur soutien constant, leurs encouragements et les précieux moments de détente partagés.

À tous ceux qui ont croisé ma route et ont contribué, directement ou indirectement, à l'aboutissement de ce travail, je vous adresse ma profonde reconnaissance.

Akrem...

Table des matières

Introduction Générale.....	6
1. Introduction.....	9
2. Les substituts de ciments :.....	9
2.1. Définition.....	9
2.2. Avantages des substituts cimentaires.....	9
2.2.1. Avantages techniques	9
2.2.2. Avantages économiques	9
2.2.3. Avantages écologiques	10
2.3. Importance des substituts cimentaires.....	10
2.4. Les différents types de substituts cimentaires.....	11
2.4.1. La poudre de verre	11
2.4.2. Le fumé de silice (SF)	12
2.4.3. Déchets de caoutchouc	13
2.4.4. Déchets plastiques	13
2.4.5. Les coquilles d'œufs	14
2.4.6. Les cendres volantes	14
2.4.7. Les laitiers de haut fourneau (LHF)	15
2.4.8. La vase de barrage	16
1. Introduction.....	18
2. La problématique de l'envasement des barrages.....	18
3. Les sédiments de dragage (vase).....	19
3.1. Définition.....	19
3.2. Origine.....	20
3.3. Constitution.....	20
4. Le dragage des vases des barrages.....	21
5. Problématique de dépôt des vases des barrages.....	22
6. La vase de barrage de l'étude.....	22
6.1. Origine.....	22
6.2. La préparation de la vase de barrage.....	23
7. Conclusion.....	24
1. Introduction.....	26
2. Matériaux de construction de base.....	26
2.1. Ciment CEM I/42,5.....	26
2.2. Sable.....	27

2.3.	La vase de barrage	28
3.	Caractéristiques physico-chimiques	28
3.1.	Analyse granulométrique Essai :	28
3.2.	Masse volumique absolue et apparente des granulats	29
3.3.	Module de finesse	30
3.4.	L'équivalent de sable	30
3.5.	La composition chimique du clinker	31
3.6.	La composition chimique de la poudre de la vase de barrage	32
4.	Composition des différents mélanges.....	32
5.	Essais de caractérisations	33
5.2.	Essais à l'état frais :	33
	5.2.1. L'étalement :	33
5.3.	Essais à l'état durci :	34
	5.3.1. Résistance à la compression :	34
	5.3.2. La vitesse d'impulsion ultrasonique :	35
	5.3.3. Attaque chimique : Perte en poids	35
6.	Mode d'opération	35
6.1.	Préparation des échantillons	35
6.2.	Malaxage	36
6.3.	Le moulage	36
6.4.	La cure	37
7.	Conclusion.....	38
1.	Introduction	33
2.	Propriété à l'état frais	33
2.1.	Etalement	33
3.	Propriétés à l'état durcis	34
3.1.	La résistance à la compression	34
3.2.	3.2. Vitesse ultrason	36
3.3.	Attaque chimique : Perte en poids	38
4.	Conclusion.....	41
	Conclusion générale	50

Introduction Générale

La construction durable et l'innovation en génie civil sont devenues des enjeux primordiaux à l'échelle mondiale. Avec l'accroissement des préoccupations environnementales et les défis posés par les changements climatiques, il est impératif de repenser les matériaux de construction traditionnels pour minimiser leur impact écologique. Le ciment, composant essentiel du béton, est l'un des matériaux les plus utilisés dans l'industrie de la construction, mais sa production est également l'une des plus grandes sources de gaz à effet de serre.

Dans ce contexte, la recherche de substituts au ciment est une démarche essentielle pour la protection de l'environnement. La valorisation des sous-produits industriels et des déchets, comme les écoproduits et les géo-déchets, est une approche prometteuse pour développer des bétons et mortiers à haute performance, tout en réduisant leur empreinte carbone. L'incorporation d'additions minérales, telles que des cendres volantes, des laitiers de haut fourneau et des pouzzolanes naturelles ou artificielles, s'est avérée efficace pour améliorer les propriétés du béton, notamment sa fluidité, sa résistance et sa durabilité.

Ce mémoire s'inscrit dans cette démarche innovante et écologique. Il explore l'utilisation de la vase de barrage de Séd Benni Haroun comme matériau de substitution partiel du ciment. La vase de barrage, souvent considérée comme un déchet, possède des propriétés pouzzolaniques potentielles qui pourraient être exploitées pour renforcer le béton tout en réduisant les impacts environnementaux liés à la production de ciment.

L'étude a pour objectif de substituer le ciment par la vase de barrage à des taux de 10%, 20% et 30%, et d'évaluer les performances des mélanges obtenus en termes de maniabilité, résistance à la compression, propagation des ondes ultrasonores, et résistance à l'attaque acide. Les résultats montrent des variations significatives des propriétés du béton en fonction des pourcentages de vase incorporée, indiquant des améliorations notables de la résistance mécanique et de la durabilité du béton.

Ainsi, ce mémoire se structure autour des axes suivants :

- ✓ **Chapitre 1** : Une recherche bibliographique approfondie sur les différents substituts cimentaires et leurs avantages écologique et économique.
- ✓ **Chapitre 2** : Présentation des propriétés de la vase de barrage de Séd Benni Haroun et de sa préparation en tant qu'additif pour le béton.

- ✓ **Chapitre 3** : Étude expérimentale des propriétés des mélanges de béton modifiés avec différents pourcentages de vase de barrage.
- ✓ **Chapitre 4** : Analyse des résultats obtenus et discussion sur l'efficacité de la vase de barrage comme substitut partiel du ciment.

En adoptant une approche intégrée de recherche et d'application, ce travail vise à contribuer de manière significative à la construction durable et à la valorisation des déchets, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles perspectives dans le domaine du génie civil.

Chapitre I :

Etat de l'art

1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de dresser un état des lieux sur l'utilisation des géo déchets dans le domaine de la construction. En recourant à des matériaux usagés comme matières premières, cette pratique vise à atténuer la pression exercée sur les ressources naturelles, qu'elles soient énergétiques ou non, tout en réduisant l'impact sur l'environnement. L'accent sera mis sur la valorisation et la réutilisation des déchets dans la construction, mettant en lumière leur potentiel en tant que matériaux supplémentaires de ciment. De plus, l'analyse portera sur les implications environnementales de cette démarche, soulignant à la fois les avantages écologiques et les défis associés à l'utilisation de déchets dans le secteur de la construction.

2. Les substituts de ciments :

2.1. Définition

Les substituts cimentaires désignent fréquemment des résidus industriels susceptibles d'être réutilisés en tant qu'addition ou alternative au ciment. Ces matériaux se caractérisent par leur finesse granulométrique et sont généralement intégrés au ciment pour conférer au béton ses propriétés, grâce à leur activité hydraulique et/ou pouzzolanique. Leur inclusion permet d'enrichir les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. [1]

2.2. Avantages des substituts cimentaires

2.2.1. Avantages techniques

L'ajout de particules fines à un mélange de béton présente plusieurs avantages. Tout d'abord, cela améliore la maniabilité du béton et réduit le besoin en eau pour obtenir une consistance donnée, à l'exception des matériaux à très grande surface active, tels que les fumées de silice. De plus, l'incorporation d'ajouts cimentaires a généralement pour effet d'améliorer la résistance, l'imperméabilité et la résistance aux attaques chimiques du béton. Enfin, en réduisant la chaleur d'hydratation des ciments mélangés, les ajouts cimentaires contribuent à limiter les risques de fissuration dans le béton. [2]

2.2.2. Avantages économiques

Le ciment Portland représente la composante la plus onéreuse d'un mélange de béton, étant donné qu'il s'agit d'un matériau à forte intensité énergétique. De nombreux matériaux susceptibles de le remplacer dans les mortiers ou bétons sont des sous-produits, nécessitant relativement moins d'énergie voire aucune lors de leur substitution, et sont bien moins coûteux que le ciment Portland. Par exemple, dans le cas d'un béton standard, l'incorporation

de cendres volantes permet de réduire le coût d'environ 10 à 30% par rapport à l'utilisation exclusive de ciment Portland. [2]

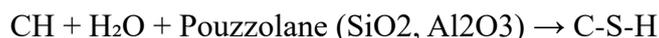
2.2.3. Avantages écologiques

La production d'une tonne de ciment Portland entraîne le rejet dans l'atmosphère d'une quantité presque équivalente de gaz carbonique (CO₂), soit environ une tonne de CO₂ pour une tonne de ciment. Par conséquent, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires permet de réduire proportionnellement les émissions de CO₂. Par exemple, la production d'une tonne de ciment géopolymère à base de kaolin génère seulement environ 0,180 tonne de CO₂ provenant de la combustion de carbone, comparé à une tonne de CO₂ pour les ciments Portland. [3]

2.3. Importance des substituts cimentaires

Les ajouts cimentaires finement broyés remplissent les espaces intergranulaires inaccessibles aux grains de ciment, ce qui rend le mélange plus fluide et permet de réduire la quantité d'eau nécessaire. L'hydratation du ciment Portland libère une importante quantité de chaux suite à la réaction d'hydratation du C₃S et du C₂S, représentant environ 30% de la masse du ciment. Cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte cimentaire hydratée et peut même poser des problèmes de durabilité en étant facilement lessivée par l'eau. [4]

Ces ajouts cimentaires, lorsqu'ils sont actifs, réagissent avec cette chaux libérée lors de l'hydratation du ciment pour former des silicates calciques hydratés (C-S-H) et des aluminates calciques hydratés (C-A-H) [5]. Ces composés précipitent sous forme de gel, durcissant pour former une structure amorphe. La réaction pouzzolanique se produit en solution, impliquant la dissolution et la précipitation entre la silice et l'alumine provenant de la dissolution de la pouzzolane, ainsi que l'hydroxyde de calcium (CH) résultant de l'hydratation du ciment. Cette réaction conduit à la formation de silicates calciques hydratés (C-S-H) et d'aluminates calciques hydratés (C-A-H), qui précipitent sous forme de gel et contribuent à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. [4] [6]



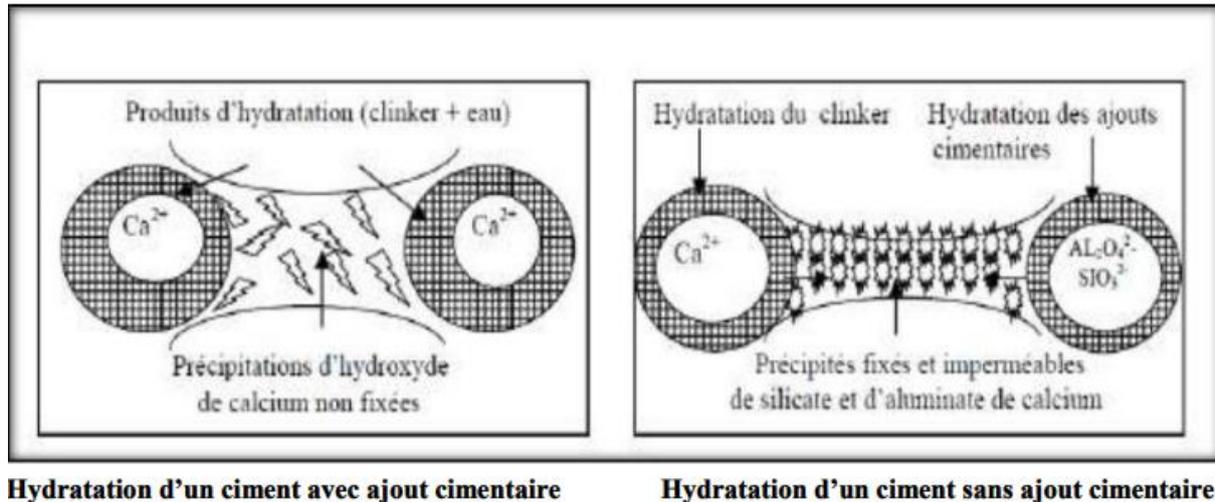


Figure 1: Hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire

2.4. Les différents types de substituts cimentaires

2.4.1. La poudre de verre

La poudre de verre est un matériau obtenu par le broyage et le traitement du verre. Ce matériau présente une texture fine, généralement sous forme de particules de taille variable. Sa production découle du recyclage du verre, une pratique de plus en plus répandue dans le cadre de la gestion des déchets. La poudre de verre est souvent utilisée comme substitut partiel ou total du ciment dans la fabrication du béton et d'autres matériaux de construction. En tant que matériau de substitution cimentaire, la poudre de verre peut offrir plusieurs avantages, notamment une réduction de la consommation de ciment, une diminution de l'empreinte environnementale liée à la production de ciment et une valorisation des déchets de verre. Cependant, son utilisation nécessite une évaluation approfondie de ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques afin d'assurer sa compatibilité avec les autres composants du béton et de garantir la qualité et la durabilité des structures construites. [7]



Figure 2: La Poudre de verre

2.4.2. Le fumé de silice (SF)

Est un sous-produit issu des industries fabriquant du silicium et des alliages de ferro-silicium. Sa production se déroule à des températures très élevées, atteignant environ 2000°C, lors de la réduction du quartz de haute pureté par du coke, du charbon ou des copeaux de bois dans une chaudière à arc électrique [8]. Le SF, considéré comme un ajout cimentaire supplémentaire (SCM) largement reconnu, possède des propriétés pouzzolaniques et un effet de remplissage physique. Sa silice amorphe (SiO_2) hautement réactive réagit avec le Ca(OH)_2 présent dans les composites cimentaires en présence d'eau pour former un gel de calcium-silicate-hydrate (CSH), conférant ainsi des propriétés liantes et de résistance au composite. Sous forme de poudre blanche ou grise, le SF est composé de particules extrêmement fines et sphériques [9].



Figure 3: Le fumé de silice

2.4.3. Déchets de caoutchouc

Les caoutchoucs synthétiques, produits à partir de dérivés du pétrole. Ces matériaux sont largement utilisés dans divers secteurs tels que l'automobile (pneumatiques, systèmes de freinage, airbags, joints d'étanchéité, etc.), l'industrie, le domaine médical, ainsi que dans la fabrication de colles et d'adhésifs. [10]



Figure 4: Le déchets de caoutchouc

2.4.4. Déchets plastiques

Ces déchets sont le résultat de processus industriels, de transformations diverses ou de la consommation, et comprennent également les produits plastiques destinés à être jetés. Les déchets plastiques peuvent être intégrés dans des matrices cimentaires en tant que liant pour fabriquer un matériau composite à haute performance, ou bien être ajoutés au béton sous forme de grains, de fibres ondulées ou rectilignes. [10]



Figure 5: Les déchets plastiques

2.4.5. Les coquilles d'œufs

Souvent récupérées des déchets provenant de la restauration et de la transformation des aliments, représentent une ressource abondante et peu coûteuse avec des caractéristiques prometteuses pour diverses applications. Composées à 95,1 % de carbonate de calcium, principalement sous forme de calcite cristallisée, ainsi que de 3,3 % de protéines et 1,6 % d'eau, ces coquilles offrent une base solide pour plusieurs utilisations. En raison de sa composition riche en carbonate de calcium (CaCO_3), la coquille d'œuf trouve déjà des applications dans l'alimentation animale, en tant que substitut de la chaux (Ca(OH)_2) [11], ou même comme engrais. Dans le domaine du génie civil, elle peut être transformée pour produire du carbonate de calcium purifié, utilisé dans la construction comme matériau de construction ou comme additif dans le ciment et le mortier [7].



Figure 6: Les coquilles d'œufs

2.4.6. Les cendres volantes

Les cendres volantes de charbon sont des résidus générés par la combustion du charbon pulvérisé dans les centrales électriques. Principalement utilisées dans la fabrication du béton, elles se composent principalement de silice, d'alumine, de fer et de calcium. On y trouve également d'autres éléments tels que le magnésium, le soufre, le sodium et le potassium, ainsi que des traces de carbone et de composés cristallins. Leur densité relative spécifique varie généralement entre 1,9 et 2,8, et elles sont le plus souvent de couleur grise ou beige. [12]



Figure 7: Les cendres volantes

2.4.7. Les laitiers de haut fourneau (LHF)

Sont des sous-produits de la production de fonte, refroidis brusquement par aspersion d'eau. Ils acquièrent des propriétés hydrauliques lorsqu'ils sont activés. Leur couleur, variant du gris au blanc cassé, dépend de facteurs tels que leur teneur en humidité et leur composition chimique [13]. Le LHF broyé se présente sous forme de nodules avec un diamètre maximal de particules inférieur à 100 μm . Sur le plan chimique, il est composé d'environ 40 à 50% d'oxyde de calcium, 25 à 35% de silice, 12 à 30% d'alumine, ainsi que de faibles quantités de magnésie et d'autres oxydes, une composition pratiquement similaire à celle du clinker [14].



Figure 8: Les laitiers de haut fourneau

2.4.8. La vase de barrage

La vase des barrages, résultant de la sédimentation, est constituée de végétaux et de débris d'origine animale, formant progressivement une couche épaisse au fond des réservoirs. Cette accumulation, issue de la décomposition de ces matières organiques, représente un défi majeur pour la gestion des barrages. Pour prévenir l'accumulation excessive de ces sédiments, il est impératif de mettre en place des mesures de gestion appropriées. Une solution envisageable pour gérer ces sédiments consiste à les extraire des barrages et à les réutiliser comme matériau de construction ou de remblai. Avant toute utilisation, il est toutefois essentiel d'évaluer rigoureusement leurs propriétés géotechniques et mécaniques [15]. Cette approche permettrait ainsi de valoriser les sédiments des barrages tout en contribuant à la gestion durable des ressources et à la réduction de leur impact environnemental. [4]



Figure 9: La vase de barrage

Chapitre II :
La vase de barrage
dans le béton

1. Introduction

L'utilisation de la vase calcinée comme substitut du ciment dans les bétons présente plusieurs avantages environnementaux. En premier lieu, elle permet de réduire la quantité de ciment nécessaire, diminuant ainsi les coûts de production du béton. De plus, la fabrication du ciment est extrêmement énergivore et contribue significativement aux émissions de CO₂, avec environ une tonne de dioxyde de carbone libérée par tonne de ciment produite. En intégrant la vase calcinée, on réduit non seulement l'empreinte carbone du béton, mais on valorise également un déchet industriel, contribuant ainsi à une gestion plus durable des ressources et à la réduction des déchets.

Dans ce contexte, ce chapitre a pour but de démontrer l'utilisation et la valorisation de la vase calcinée comme substitut de ciment, en soulignant ses bienfaits économiques et écologiques.

2. La problématique de l'envasement des barrages

L'envasement désigne l'accumulation de sédiments dans les réservoirs et les barrages, ce qui entraîne une diminution de leur capacité de stockage entraînant une diminution directe de leur volume suite à l'accumulation de la vase au fil des ans. La présence de cette vase déposée au niveau de la digue du barrage peut présenter un risque important pour la stabilité de la structure et de ses équipements hydrauliques. Ainsi, il est impératif de procéder à l'enlèvement de cette quantité importante de vase afin d'assurer la stabilité et la durabilité des barrages. [16]
[17]

Chapitre II : La vase de barrage dans le béton

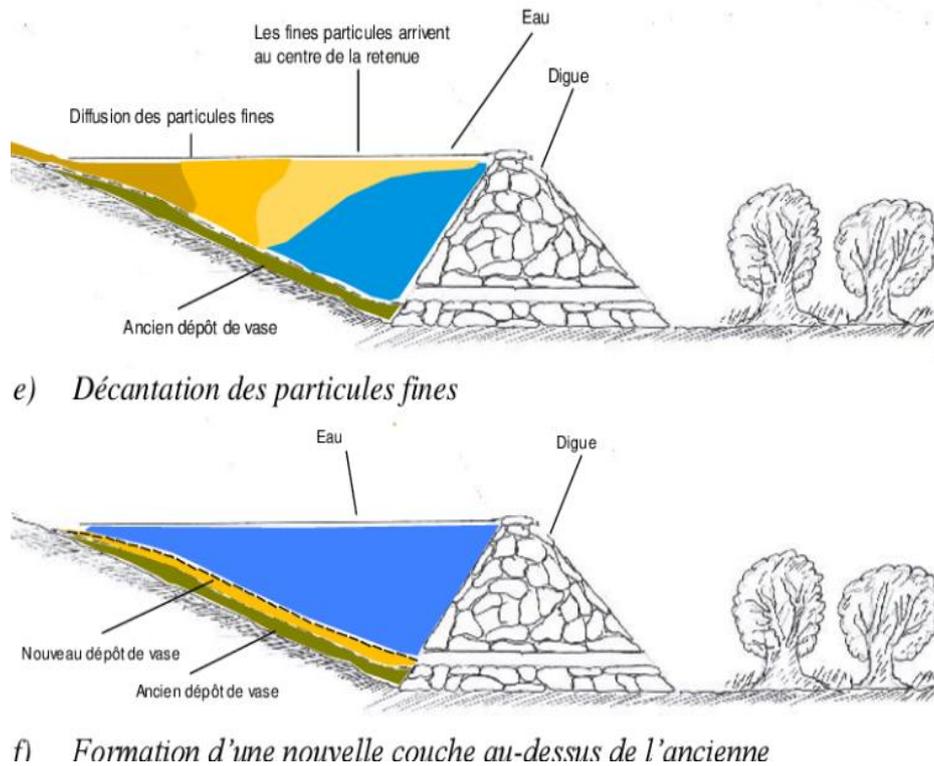


Figure 10: La problématique de l'envasement des barrages

3. Les sédiments de dragage (vase)

3.1. Définition

Les sédiments, souvent appelés vases, sont définis comme un ensemble formé par l'accumulation de particules de tailles variées ou de matières précipitées, ayant subi individuellement un certain transport. La sédimentation désigne l'ensemble des processus par lesquels ces particules organiques ou minérales en suspension et en transit cessent de se déplacer [18].

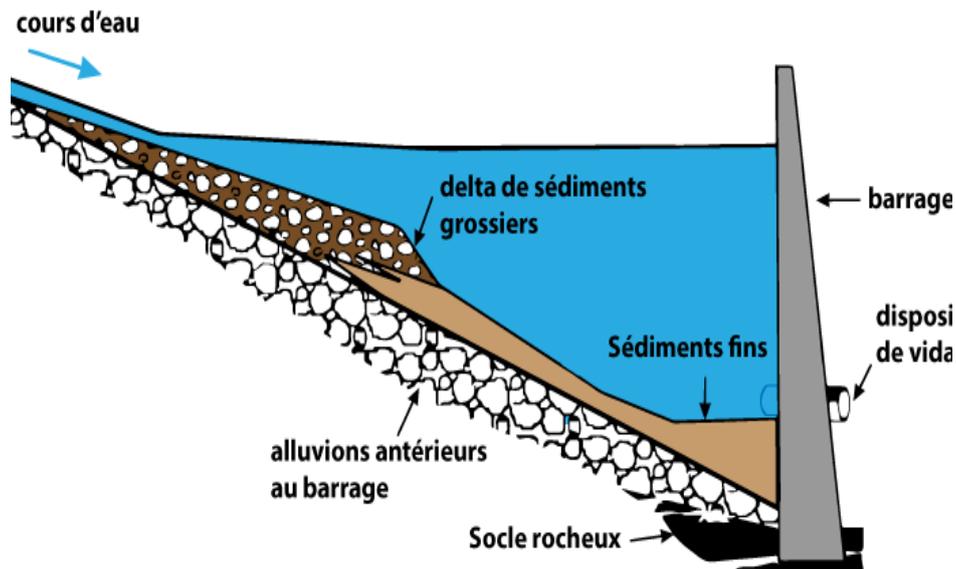


Figure 11: Les sédiments de dragage

3.2. Origine

On distingue deux origines pour les sédiments :

- 1- **Origine endogène** : les particules proviennent de la production autochtone du milieu, comprenant des débris de macrophytes tels que les plantes aquatiques, ainsi que des cadavres de microphytes et d'animaux. [19]
- 2- **Origine exogène** : ces particules résultent du ruissellement des eaux ou sont transportées par les vents. Qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique, elles proviennent de l'érosion des sols, de la décomposition de matière végétale, et de l'apport de matières en suspension, organiques, de nutriments ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques [20].

3.3. Constitution

Les vases sont composées de quatre éléments principaux : [21]

- 1- **Matrice minérale** : quartz, feldspaths ou carbonates.
- 2- **Fraction argileuse** : kaolinite, illite ou montmorillonites.
- 3- **Fraction organique** : débris végétaux, micro-organismes, acides fulviques et humiques.
- 4- **Eau** : présente sous différentes formes.
 - a- L'eau colloïdale qui hydrate les colloïdes ;

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

4. Le dragage des vases des barrages

Le dragage est le processus d'extraction des matériaux situés au fond d'un plan d'eau, souvent considéré comme la méthode la plus sûre pour contrer l'envasement des barrages. Cependant, selon certains experts, la restauration de la capacité de stockage par cette méthode s'avère être une opération coûteuse et peu rentable, notamment pour les grands réservoirs. Dans certains pays, le dragage est nécessaire, notamment lorsque les possibilités de construire de nouveaux barrages sont limitées ou lorsque la digue est menacée par l'accumulation excessive de boues. [22]

Il existe quatre principales techniques de dragage [21] :

- 1- **Dragage en eau** : Cette méthode consiste à remettre en suspension et à disperser les sédiments par un courant naturel ou artificiel, les éparpillant ou les transférant vers une zone définie.
- 2- **Dragage hydraulique** : Utilise des pompes centrifuges qui aspirent les sédiments sous forme de boues liquides à haute teneur en eau à travers un tube d'élinde.
- 3- **Dragage pneumatique** : Fonctionne selon le même principe que le dragage hydraulique, mais l'aspiration est générée par des pompes à air comprimé.
- 4- **Dragage mécanique** : Agit par action mécanique directe d'un outil (benne, godet) sur les matériaux à draguer.

La gestion des sédiments dragués suit quatre grandes filières d'élimination : le stockage sous eau, la mise en décharge, le stockage à sec et la valorisation.

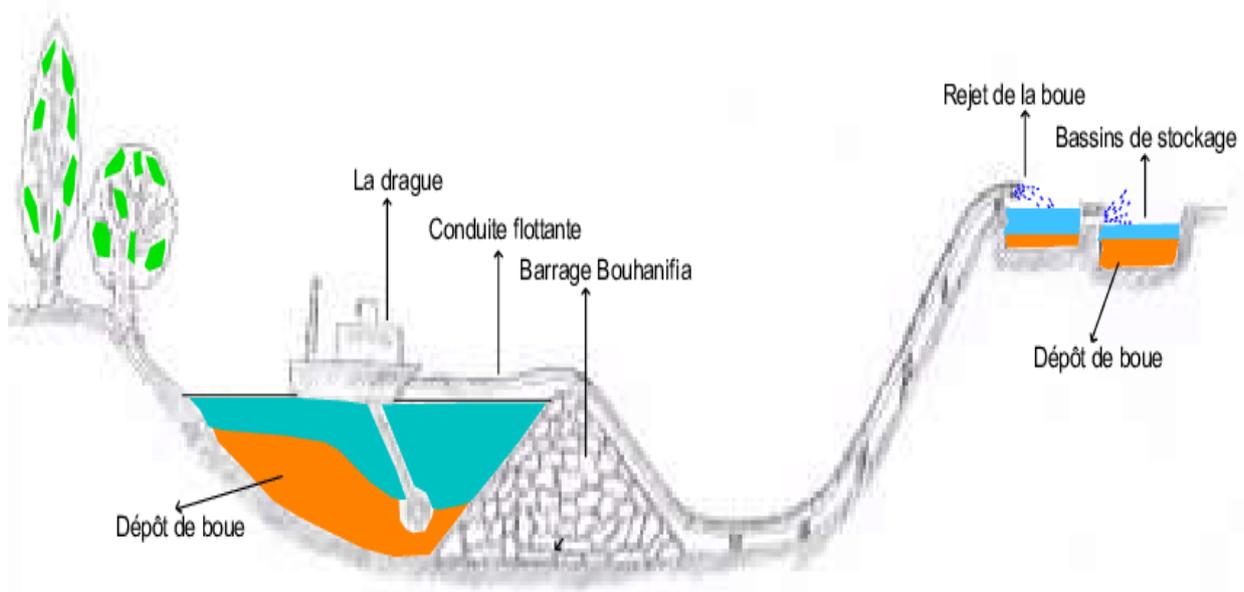


Figure 12: Opération de vidange mécanique de fond

5. Problématique de dépôt des vases des barrages

Lors des opérations de dévasement des barrages, le choix du lieu de déversement des boues draguées revêt une importance cruciale. Généralement, ces boues sont directement rejetées dans le cours d'eau en aval du barrage ou acheminées vers le site de dépôt le plus proche, sans égard pour les considérations esthétiques ou écologiques. Cependant, déverser ces boues dans la rivière en aval peut augmenter de manière significative la concentration en particules fines, ce qui peut s'avérer préjudiciable pour la biodiversité aquatique. De plus, les agriculteurs utilisant cette eau en aval sont susceptibles d'émettre des plaintes concernant la turbidité élevée de l'eau, du fait de la présence de particules en suspension. [22]

Il est donc primordial de choisir judicieusement le lieu de déversement afin de minimiser l'impact environnemental et les nuisances potentielles. Des solutions alternatives, comme l'aménagement de bassins de décantation ou la valorisation de ces sédiments dans des matériaux de construction, doivent être envisagées pour une gestion durable des vases de barrage. [22]

6. La vase de barrage de l'étude

6.1. Origine

La vase utilisée dans la fabrication des mortiers a été extraite du barrage de Beni Haroun. Le barrage de Beni Haroun est un vaste complexe hydraulique situé dans la wilaya de Mila, au nord-est de l'Algérie (ANBT, 2005). Ses coordonnées géographiques sont 36°32'16.21"N –

Chapitre II : La vase de barrage dans le béton



Figure 14: Etapes de préparation de la vase calcinée de barrage : (a) Extraction, (b) La vase à l'état humide(c,d) Calibrage 25mm, (e) Etuve à 105°C, (f) Broyage, (g) Tamisage 80 μm , (h) Traitement thermique 750°C pendant 5heures

7. Conclusion

Ce chapitre permettra d'approfondir la compréhension des caractéristiques de la vase de barrage en tant que matériau alternatif dans les bétons, ainsi que ses implications sur les performances et la durabilité des structures en béton.

Chapitre III :
Etude expérimentale

1. Introduction

Ce chapitre présente une analyse détaillée des matériaux et des essais expérimentaux clés pour la mise en œuvre de notre programme de recherche. Nous utilisons une gamme de composants couramment disponibles et largement employés localement pour la formulation de mortiers incorporant de la vase de barrage calcinée. Les composants sélectionnés comprennent un ciment de type CEM I/42,5, du sable de dune provenant d'Oued Souf, du sable concassé de carrière de la fraction 0/3, une poudre de vase de barrage calcinée ainsi que de l'eau potable du réseau urbain.

Cette palette de matériaux nous permet d'élaborer des compositions de mortiers représentatives de celles couramment utilisées, tout en valorisant un matériau alternatif prometteur issu des sédiments de barrages.

2. Matériaux de construction de base

2.1. Ciment CEM I/42,5

Pour cette étude, le ciment sélectionné est un ciment de type CEM I/42,5 provenant de la région de Biskra. Les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques de ce ciment ont été obtenues à partir des fiches techniques fournies par le cimentier. Ce ciment, couramment utilisé dans la construction locale, répond aux exigences normatives en vigueur et constitue un liant hydraulique de référence pour la formulation des mortiers.



Figure 15: Ciment 42.5 du Biskra - Labo GC- université de BBA

2.2. Sable

Selon la norme NF P18-541, le sable doit présenter des qualités spécifiques pour être adapté à la fabrication de mortiers. Avant son utilisation dans la construction, il est impératif de procéder à des essais en laboratoire afin d'évaluer ses caractéristiques et de s'assurer qu'il satisfait aux exigences normatives en vigueur. Les sables employés dans cette étude sont :

- **Sable de Carrier** : un sable concassé du fraction 0/3 provient du carrier de Bordj Bou Arreridj



Figure 16: Sable concassé

- **Sable de Dune** : provient de la région d'Oued Souf, située à 620 km au sud-est d'Alger. Il s'agit d'un sable naturel propre, principalement composé de fines particules de silice arrondies, dont la granulométrie se situe entre 0,08 et 3 mm. Sa forme arrondie et sa nature siliceuse confèrent à ce sable des propriétés adéquates pour une utilisation dans la formulation de mortiers.



Figure 17: Sable de Dune de Oued Souf

2.3. La vase de barrage

La vase utilisée dans la fabrication des mélanges a été extraite du barrage de Beni Harroun, situé dans la wilaya de Mila, au nord-est de l'Algérie. Après avoir été prélevée, elle a été soumise à un traitement thermique par calcination dans un four lent, à une température constante de 750 ± 5 °C, avec un réglage de 5 °C par minute pendant 5 heures. Avant cela, elle avait été étuvée, broyée et tamisée à une taille de 80 μm .



Figure 18: La poudre de la vase de barrage

3. Caractéristiques physico-chimiques

3.1. Analyse granulométrique Essai :

L'analyse granulométrique consiste à séparer un matériau granulaire, tel que du gravier ou du sable, en différentes fractions granulaires à l'aide d'une série de tamis de dimensions décroissantes. Cette opération permet de déterminer la répartition des différentes tailles de particules présentes dans le matériau. Les résultats sont ensuite représentés sous forme d'une courbe granulométrique. La Figure 19 illustre les courbes granulométriques spécifiques des sables utilisés dans cette étude.

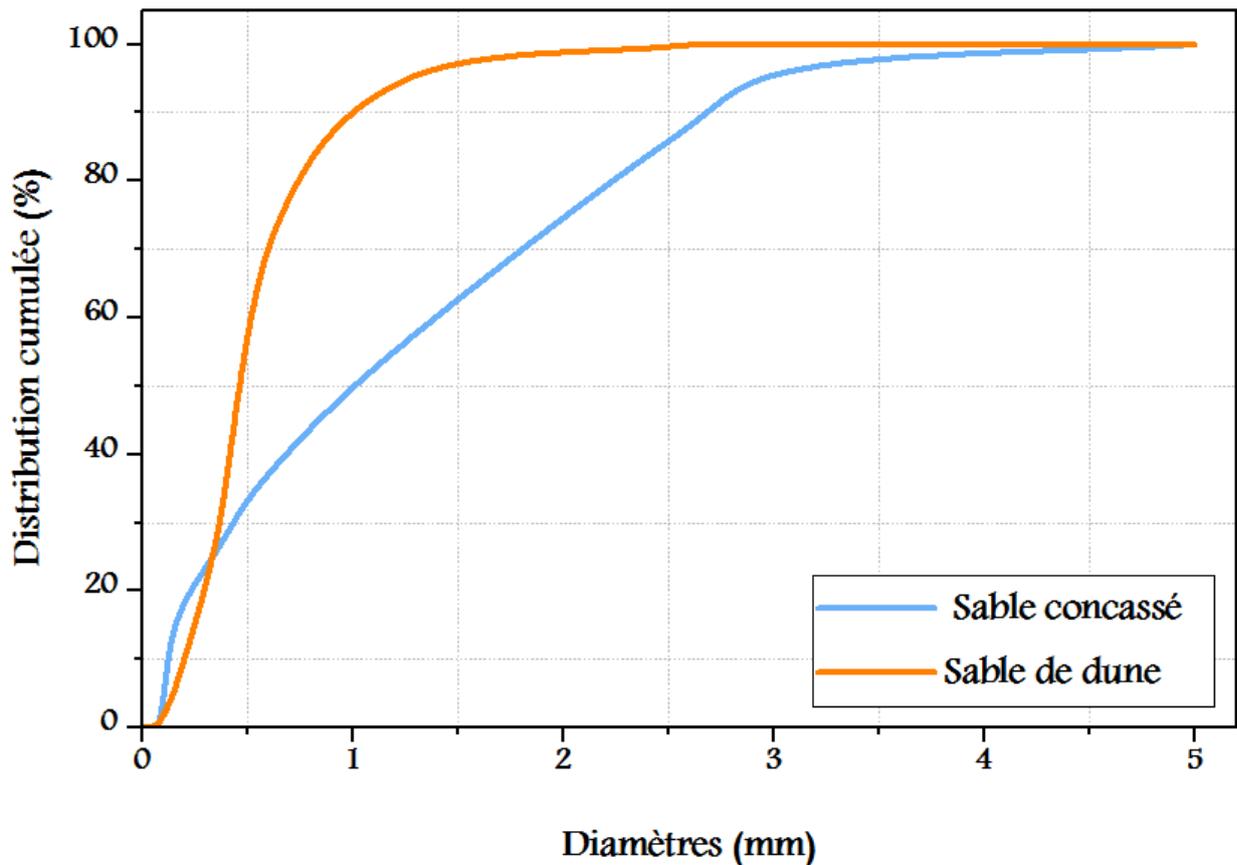


Figure 19: Courbe granulométrique des sables.

3.2. Masse volumique absolue et apparente des granulats

La masse volumique est une propriété physique caractérisant la masse d'un matériau par unité de volume. Pour les granulats, on distingue deux formes de masse volumique, la masse volumique apparente et la masse volumique absolue.

- **La masse volumique absolue (γ_{ab})** correspond à la masse par unité de volume du matériau massif constituant les grains, sans tenir compte des vides interstitiels entre les grains.
- **La masse volumique apparente (γ_{ap})** rend compte de la masse par unité de volume en incluant les espaces vides entre les grains. Elle est donc dépendante du degré de compacité du matériau granulaire.

La connaissance de ces deux grandeurs est essentielle pour le dimensionnement et la formulation optimale des mélanges à base de granulats. Le **Tableau 1** présente les valeurs des masses volumiques apparente et absolue mesurées pour le sable utilisé dans cette étude.

Chapitre III : Études expérimentales

Tableau 1: Valeurs des masses volumiques des sables

Valeur de masse	Absolue (kg/m ³)	Apparente (kg/m ³)
Sable de Dune	2608	1617
Sable concassé	2510	2275

3.3. Module de finesse

La finesse d'un sable peut être caractérisée par son module de finesse (Mf) qui correspond à la somme des % des refus cumulés, ramenés à l'unité, sur les tamis de maille : 0,160 -0,315 - 0,631,25-2,5-5 mm. Le **Tableau 2** présente les valeurs des modules de finesse pour les sables utilisés dans cette étude.

Tableau 2: Valeurs des modules de finesse des sables

Type de sable	Module de finesse
Sable de Dune	1.98
Sable concassé	2.9

3.4. L'équivalent de sable

Conformément à la norme NF EN 933-8+A1 relative aux essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, l'essai d'équivalent de sable est effectivement un test permettant d'évaluer la propreté d'un échantillon de sable. Son principe consiste à introduire le sable dans une éprouvette remplie d'une solution floculante. Après agitation, les particules fines argileuses présentes dans le sable se regroupent et remontent par floculation vers la partie supérieure de l'éprouvette, formant une couche de boue au-dessus du sable propre. La hauteur de la couche de boue par rapport à la hauteur totale de l'échantillon permet de calculer l'équivalent de sable, exprimé en pourcentage. Plus sa valeur est élevée, plus le sable est considéré comme propre et exempt d'éléments fins indésirables.

Chapitre III : Études expérimentales



Figure 20: l'essai d'équivalent de sable (labo génie civil)

Les résultats de l'équivalent de sable obtenus pour les sables utilisés sont présentés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3: Valeurs de l'équivalent de sable.

Valeur de ES	ESV	ESP
Sable de dune	87	85
Sable de carrière	76	74

D'après les résultats de l'essai, le sable de dune peut être classé comme un sable très propre ($ES=85 > 80$), tandis que le sable de carrière est considéré comme un sable propre ($70 < ES=74 < 80$).

3.5. La composition chimique du clinker

Les résultats de la composition chimique du clinker du ciment sont présentés dans le **Tableau 4**.

Chapitre III : Études expérimentales

Tableau 4: Caractéristiques chimiques et physique du ciment utilisé.

Elément	CaO %	SiO2 %	Na2O %	Mgo %	Al2O3 %	K2O %	P2O5 %	Fe2O3 %	So3 %	Autres	Densité Abs(kg/m3)	Finesse (cm2/g)
CEM I 42.5	61.6	20.40	/	1.73	5.53	/	/	3.54	2.29	4.91	3100	3600

3.6. La composition chimique de la poudre de la vase de barrage

La vase calcinée présente une surface spécifique de 8310 cm²/g et une densité de 2,74 g/cm³. Leur composition minéralogique a été déterminée par fluorescence X sur poudre. Les résultats obtenus, mettent en évidence des pourcentages élevés en oxydes (SiO₂ + Al₂O₃ + CaO) : Les caractéristiques chimiques de la vase sont fournies dans le **Tableau 5**.

Tableau 5: composition minéralogique de la poudre de la vase de barrage

Elément	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	Na2O	K2O	PF
Teneur en %	47.36	15.57	7.43	2.67	23.08	0.37	1.97	1.63

4. Composition des différents mélanges

Notre étude expérimentale a impliqué l'ajout d'une proportion de 10%, 20 % et 30% par rapport au poids du ciment en additions poudre de la vase de barrage. Le rapport ciment/sable (C/S) utilisé était de 1/3 en poids. Pour les mortiers témoins, le rapport (E/C) employé dans leur fabrication était de 0,5 et in pourcentage de 4% en superplastifiant. Le mélange des composants des mortiers a été effectué conformément à la norme EN 196-1. Après avoir été versés dans des moules, les mortiers ont été recouverts d'un film plastique et conservés dans l'atmosphère du laboratoire. Les échantillons ont été démoulés après 24 heures et placés dans de l'eau à une température de 20 ± 3°C jusqu'aux tests effectués aux jours 7, 28 et 90. Les différentes compositions de nos mélanges sont détaillées dans le **Tableau 6**

Chapitre III : Études expérimentales

Tableau 6: Compositions des différents mélanges de mortiers utilisés.

Quantité (kg/m ³)	MT	M10	M20	M30
Ciment	450	405	360	315
La vase de barrage (Kg/m³)	/	45	90	135
Sable de Dune (Kg/m³)	450	450	450	450
Sable concassée (Kg/m³)	900	900	900	900
SP	4%	4%	4%	4%
Eau	225	225	225	225

5. Essais de caractérisations

5.2. Essais à l'état frais :

5.2.1. L'étalement :

L'évaluation de la fluidité des matériaux cimentaires revêt une importance capitale pour comprendre leur comportement rhéologique, en particulier leur consistance. Nous avons procédé au test de fluidité en utilisant la table à secousses, conformément aux directives de la norme ASTM C. Le moule tronconique utilisé était conforme aux spécifications de la norme, avec des diamètres de 70 mm et 100 mm, ainsi qu'une hauteur de 50 mm.



Figure 21: Mesure d'étalement

5.3. Essais à l'état durci :

5.3.1. Résistance à la compression :

La résistance à la compression a été évaluée conformément à la norme EN 196-1, à des intervalles de 7 et 28 jours. Cette évaluation a été effectuée en utilisant des échantillons de dimensions $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$.



Figure 22: L'appareil de l'écrasement labo génie civil université de BBA

5.3.2. La vitesse d'impulsion ultrasonique :

Le test non destructif de la vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV) a été effectué sur des prismes de mortier à des moments précis, soit 7, 28 et 90 jours après le début du processus de durcissement. Ces essais ont été réalisés en respectant les procédures stipulées dans la norme ASTM C 597. Cette méthode consiste à mesurer le temps nécessaire à la transmission des ondes à travers le matériau, puis à calculer la vitesse de l'onde en divisant la distance parcourue par le temps mesuré.

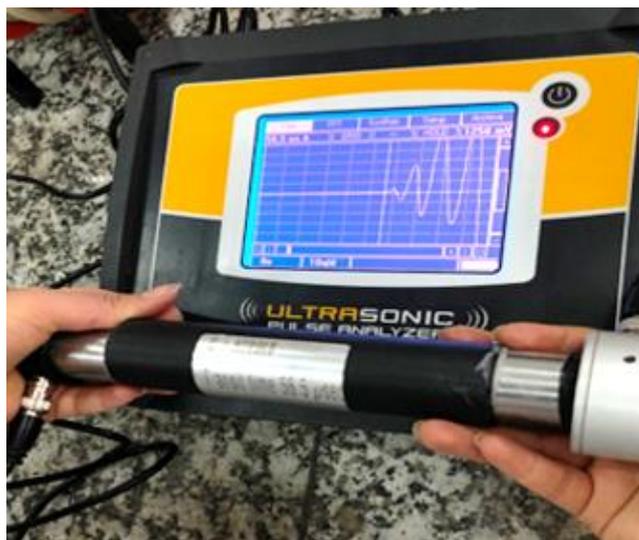


Figure 23: L'appareil Ultrason de labo génie civil de l'université de BBA

5.3.3. Attaque chimique : Perte en poids

Selon la norme ASTM C1898, les éprouvettes ont été soumises à une série d'essais afin d'évaluer leur résistance à une attaque chimique. Après un processus initial de moulage pendant 24 heures, les échantillons ont été immergés dans l'eau pendant une période de 28 jours, puis placés dans une chambre climatisée à une température de 25°C et une humidité de 55 % jusqu'à atteindre une masse constante. Ensuite, les échantillons ont été exposés à une solution d'acide sulfurique (H₂SO₄) à 3,5 %, afin de les soumettre à une agression chimique. Après un durcissement de 30, 60 jours, la perte de poids a été mesurée pour évaluer la durabilité des échantillons face à cette attaque chimique.

6. Mode d'opération

6.1. Préparation des échantillons

La préparation des échantillons a été effectuée avec rigueur pour garantir la cohérence et la fiabilité des résultats expérimentaux. Dans un premier temps, les matériaux nécessaires, tels que le ciment, le sable et la vase de barrage, ont été méticuleusement pesés.

6.2. Malaxage

Le malaxage des matériaux a été réalisé dans un malaxeur automatique, en respectant les ratios prescrits et les normes de la méthode de mélange EN 196-1. Cette procédure méticuleuse a été suivie afin d'assurer une homogénéité optimale du mélange.



Figure 24: Malaxeur automatique de labo Génie Civil de l'université BBA

6.3. Le moulage

Pour le processus de moulage, des moules appropriés ont été soigneusement préparés et nettoyés, puis les mélanges ont été coulés dans les moules avec précision. Afin de garantir une hydratation adéquate et une maturation uniforme, les échantillons ont été recouverts d'un film plastique et placés dans un environnement contrôlé à une température constante de $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Chapitre III : Études expérimentales

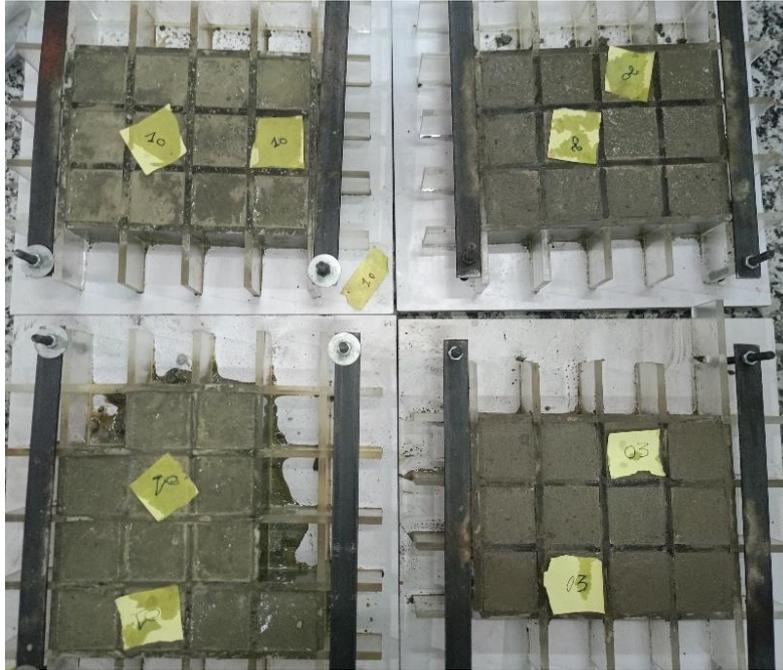


Figure 25: Coulage des mélanges

6.4. La cure

Après une période de 24 heures, les échantillons ont été démoulés avec précaution et placés dans de l'eau pour la cure jusqu'à leur utilisation dans les tests mécaniques et physiques ultérieurs à 7, 28 et 90 jours. Cette étape de préparation méticuleuse a été cruciale pour garantir la reproductibilité des résultats et la validité des conclusions de l'étude.



Figure 26: Les échantillons des mélanges

7. Conclusion

Pour conclure ce chapitre, nous avons exposé les essais de caractérisation des matériaux de base utilisés dans les divers mélanges, ainsi que leur mode de préparation. Les composants ont été évalués conformément aux normes et recommandations pour leur incorporation dans les mortiers hydrauliques, ce qui facilite l'adoption d'une approche de formulation adaptée. Ces caractéristiques intrinsèques des différents composants nous permettent de comprendre les variations de performances observées dans les mélanges soumis à différentes sollicitations.

Chapitre VI :
Résultats et Discussion

1. Introduction

Cette section des résultats et discussions se concentre sur l'exploration des performances mécaniques et physico-chimiques des mortiers cimentaires élaborés avec de la poudre de vase de barrage. Souvent considérée comme un matériau résiduel, la vase de barrage présente un potentiel intéressant pour la construction durable grâce à ses propriétés liantes et son potentiel de recyclage. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de ce composant sur les propriétés à l'état frais et durci, notamment l'étalement, la résistance à la compression, la vitesse d'impulsion ultrasonique et la résistance à l'attaque acide. L'analyse des résultats permettra de mieux comprendre les performances et les implications de ces formulations de mortiers, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles opportunités dans le domaine de la construction écologique et durable.

2. Propriété à l'état frais

2.1. Etalement

La Figure 26 illustre comment le diamètre d'étalement des mortiers varie en fonction des différents taux de la poudre de vase (10%, 20% et 30%). On observe que la fluidité du mortier a été influencée par ces variations de pourcentages.

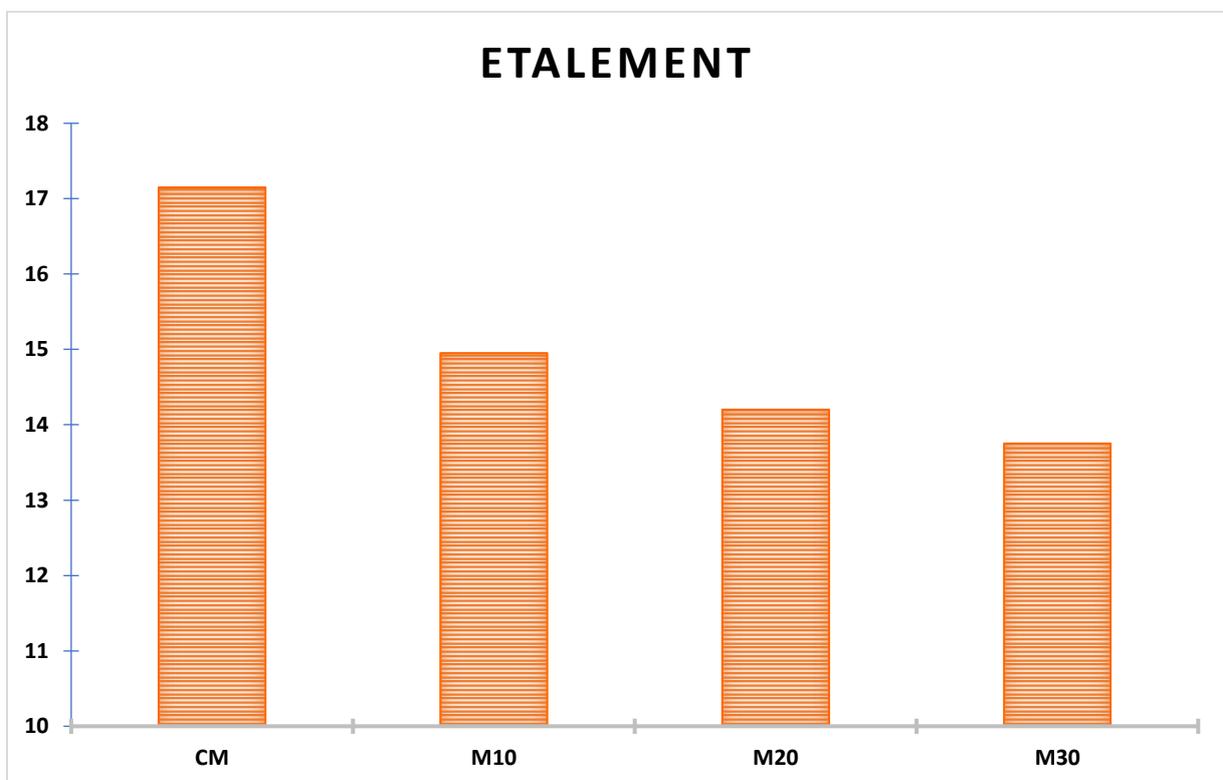


Figure 27: Etalement des différents mélanges étudiés

Chapitre VI : Résultats et Discussion

Le mélange témoin (CM) présente un étalement de 171,5 mm. En comparaison, les mélanges incorporant de la vase de barrage montrent une diminution d'environ 12.83 %, 17.20% et 19.83% de l'étalement, avec des valeurs de 149,5 mm, 142 mm et 137,5 mm pour M10B, M15B et M20B respectivement. Cette réduction est due, d'une part, à la diminution du taux de ciment substitué dans les mélanges, et d'autre part, à l'augmentation du pourcentage de vase calcinée, qui absorbe l'eau destinée à l'hydratation du ciment, réduisant ainsi l'affaissement.

3. Propriétés à l'état durcis

3.1. La résistance à la compression

La **Figure 29** illustre les résistances à la compression des mortiers à différents stades de durcissement, en tenant compte de l'incorporation de poudre de la vase. Ces résultats sont la moyenne de 3 essais sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 40 x 40 x 40 mm³.

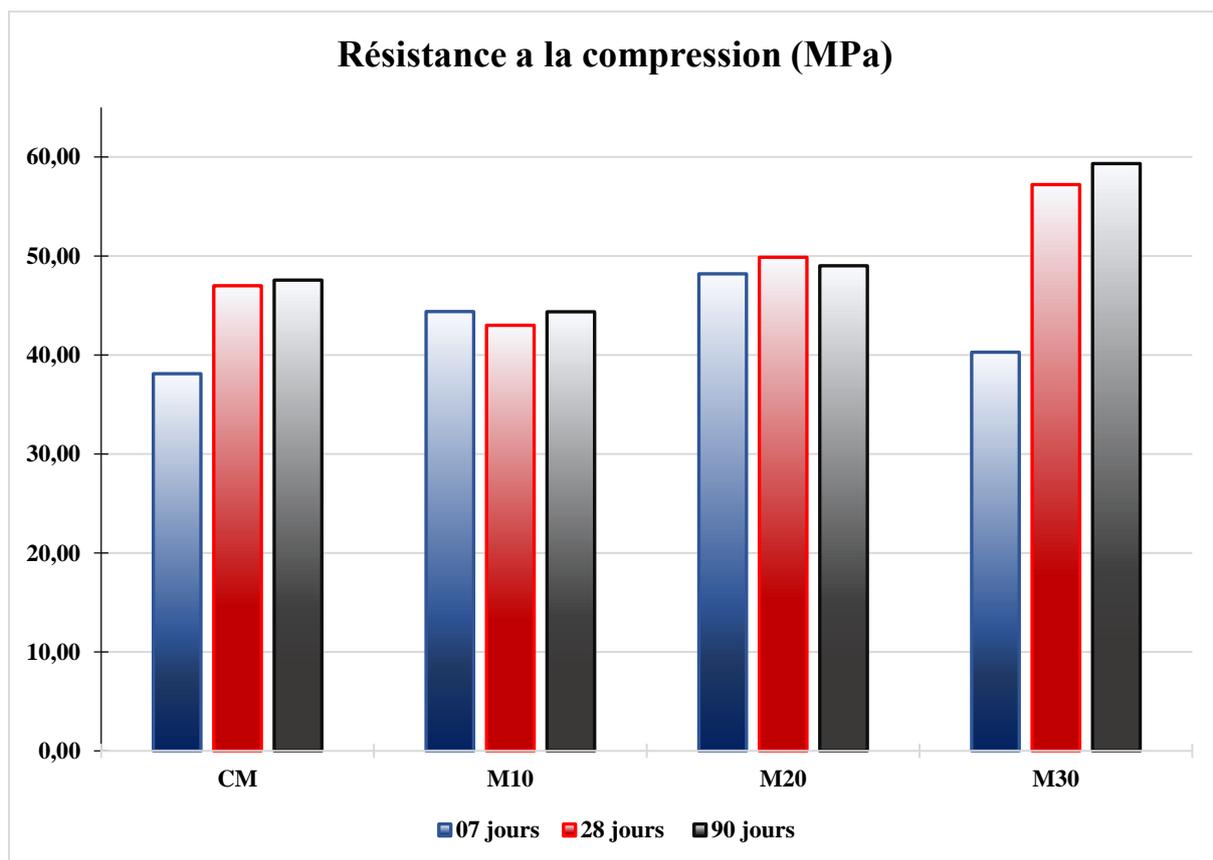


Figure 28: Résistance à la compression des différents mélanges.

D'après la **Figure 28** on ne constate que l'utilisation d'un ajout cimentaire tel que la vase de barrage augmente la résistance à la compression à 7, 28 et 90 jours du mortier par rapport au témoin.

Chapitre VI : Résultats et Discussion

Après 7 jours, le mélange témoin (CM) affiche une résistance à la compression de 38,10 MPa. L'introduction de vase de barrage conduit à une amélioration significative des performances mécaniques à ce stade. Le mélange M10 atteint 44,38 MPa, représentant une augmentation de 16,46 %. Cette tendance à la hausse se poursuit avec le mélange M20, qui atteint 48,19 MPa (+26,51 %), tandis que le mélange M30 atteint 40,28 MPa (+5,72 %).

Après 28 jours de cure, le mélange témoin (CM) affiche une résistance de 46,99 MPa. Le mélange M10 atteint 43,00 MPa, représentant une diminution modérée de 8,48 % par rapport au témoin. Cependant, les gains deviennent plus substantiels avec l'augmentation des pourcentages de vase, le mélange M20 affichant une résistance de 48,82 MPa (+24,47 %), et le mélange M30 atteignant une résistance remarquable de 57,321 MPa (+34,88 %).

De même, à 90 jours, tous les mélanges ont affiché une augmentation de la résistance avec l'incorporation de la vase de barrage. Le mélange témoin (CM) présente une résistance de 47,56 MPa. Le mélange M10 atteint 44,36 MPa, représentant une diminution de 6,74 % par rapport au témoin. Le mélange M20 montre une résistance de 49,01 MPa, marquant une augmentation de 3,05 %, et le mélange M30 atteint une résistance de 59,33 MPa, affichant une augmentation impressionnante de 24,78 % par rapport au mélange témoin. La lente activité pouzzolanique observée aux jeunes âges peut être attribuée au processus selon lequel la silice réactive présente dans la partie vitreuse des cendres de vase calcinée interagit avec le Ca(OH)_2 libéré lors de l'hydratation du ciment, permettant ainsi à la vase de fixer la chaux. Cette réaction pouzzolanique ne devient significative que tardivement, ce qui se traduit par une hydratation moins intense aux premiers stades. [24]



Figure 29: essai a la compression

3.2. 3.2. Vitesse ultrason

Les résultats de vitesse ultrason des mortiers cimentaires à base de vase de barrage sont illustrés par la figure 30. Ces résultats sont la moyenne de 3 essais sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 40 x 40 x 40 mm³.

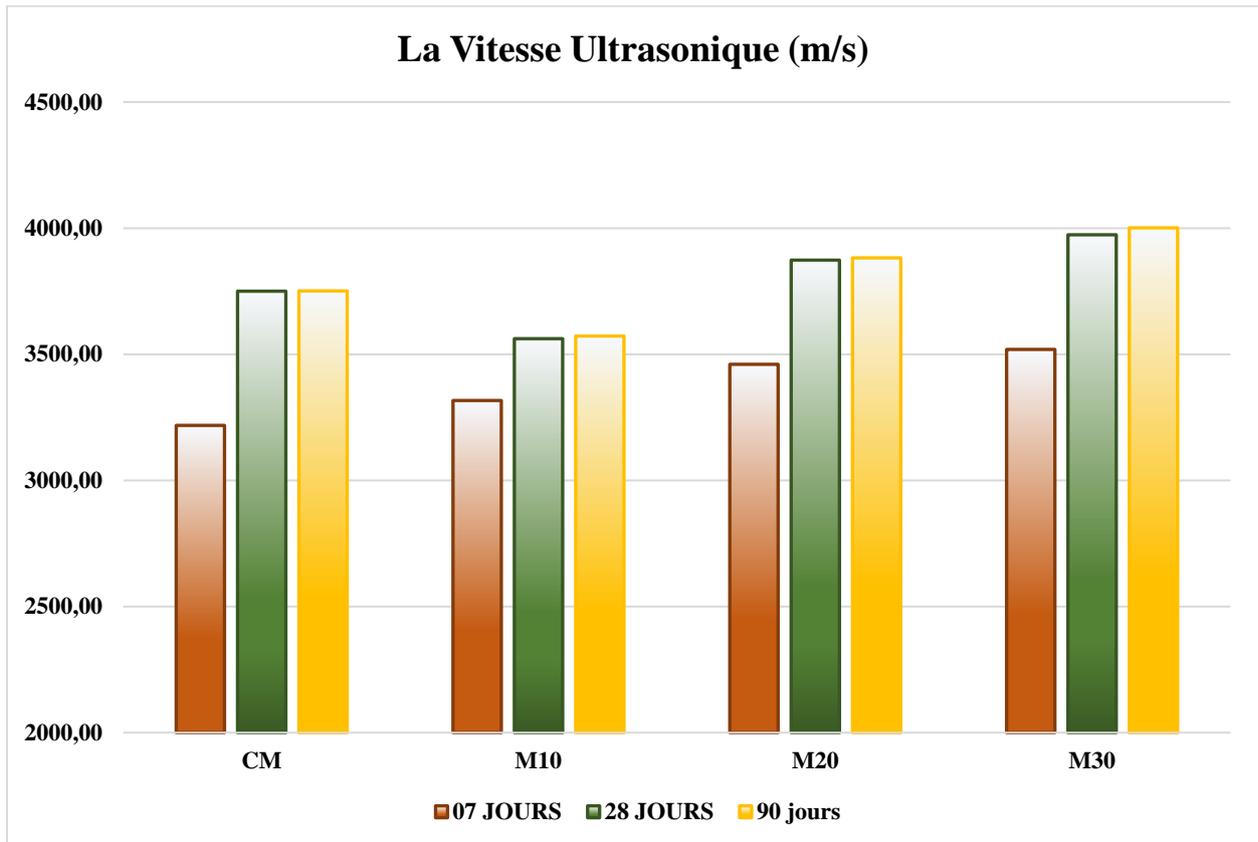


Figure 30: La vitesse ultrason des différents mélanges.

Le mélange témoin (CM) affiche une vitesse de 3218,02 m/s à 7 jours. L'incorporation de 10 % de vase dans le mélange M10 entraîne une augmentation à 3316,75 m/s (+3,06 %). On observe une progression de la vitesse pour les mélanges M20 et M30, atteignant respectivement 3460,21 m/s (+7,53 %) et 3519,27 m/s (+9,35 %) par rapport au témoin. Cette augmentation des vitesses de propagation des ondes ultrasonores (UPV) à 7 jours est probablement due à la structure interne de la vase de barrage.

À 28 jours, le mélange témoin (CM) atteint une vitesse de 3750 m/s. En comparaison, la vitesse du mélange contenant 10 % de vase diminue à 3561,88 m/s (-5,05 % par rapport au CM). Cependant, le mélange M20 marque la valeur la plus élevée, soit 3941,68 m/s (+5,11 %), et le mélange M30 affiche une valeur de 3887,67 m/s (+3,67 % par rapport au CM). Cela peut être attribué à une masse plus dense et compacte à 28 jours.[4]

À une période de 90 jours de cure, les mélanges atteignent les valeurs suivantes : 3751,23 m/s pour le mélange témoin (CM), 3572,32 m/s pour le mélange M10 présentant une diminution de 4,77 %. Pour le mélange M20, l'UPV augmente de 3,49 %, atteignant 3882,32 m/s par rapport aux témoins. De même pour le mélange M30, l'UPV augmente de 6,67 %, atteignant 4001,32

Chapitre VI : Résultats et Discussion

m/s par rapport aux 3751,23 m/s du témoin. Ces résultats montrent une tendance générale à l'augmentation de la vitesse ultrasonique avec l'augmentation du pourcentage de vase de barrage, particulièrement notable dans les mélanges M20 et M30. Cette progression peut être attribuée à la réactivité pouzzolanique de la vase et à son taux élevé de SiO_2 , qui favorisent la formation de structures internes plus denses et plus homogènes, améliorant ainsi la propagation des ondes ultrasoniques.



Figure 31: Essais du vitesse ultrason au sein de labo GC université de BBA

3.3. Attaque chimique : Perte en poids

Selon la procédure de la norme ASTM C 267 [25], les éprouvettes sont nettoyées trois fois à l'eau douce pour éliminer toute masse altérée, puis laissées à l'air libre pendant 30 minutes avant d'être pesées.

Chapitre VI : Résultats et Discussion

Un cas particulièrement agressif et destructif d'attaque acide se produit lorsque le béton est exposé à l'acide sulfurique (H₂SO₄). Le sulfate de calcium produit par la réaction entre l'acide sulfurique et l'hydroxyde de calcium entraîne une dégradation significative. Ce processus est représenté par l'équation chimique suivante :



Le suivi de la perte de poids au fil du temps des éprouvettes de mortiers immergées dans une solution d'acide sulfurique H₂SO₄ est illustré dans la figure 33.

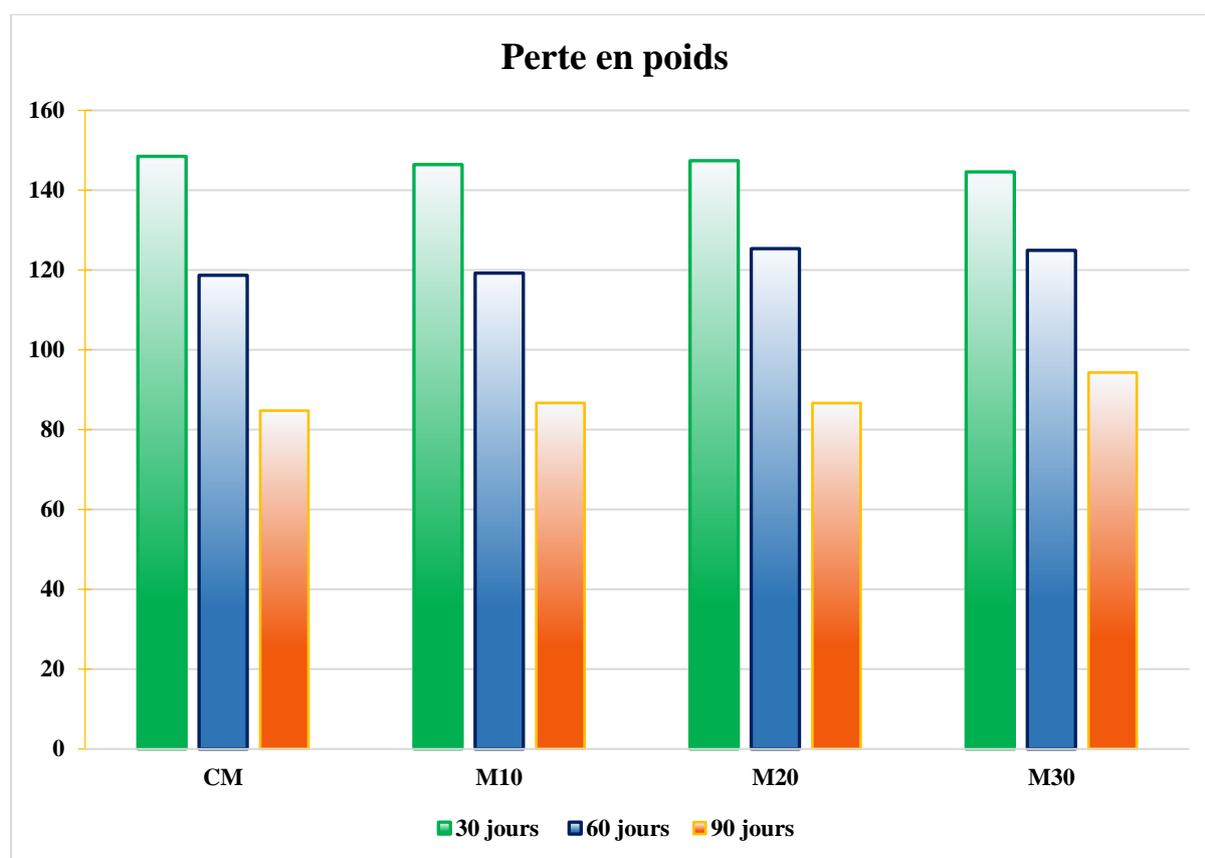


Figure 32: la perte en poids des différents mélanges après immersion au H₂SO₄.

Le mélange témoin (CM) présente une perte de masse de 30,805 g après 60 jours d'immersion dans la solution acide. Après 90 jours, la perte de masse augmente considérablement à 62,715g.

L'incorporation de 10 % de vase de barrage dans le mélange M10 entraîne une perte de masse de 27,195 g après 60 jours, représentant une diminution de la perte de masse de 1,18 % par rapport au mélange témoin (CM). Cependant, après 90 jours, la perte de masse du mélange

Chapitre VI : Résultats et Discussion

M10 augmente à 59,725 g, ce qui est légèrement inférieur à celle du mélange CM, avec une diminution de 1,39 %.

Pour le mélange M20, avec 20 % de vase de barrage, la perte de masse après 60 jours est de 22,04 g (13,63 %), montrant une réduction plus notable de 13,34 % par rapport au mélange CM. Après 90 jours, la perte de masse du mélange M20 atteint 60,735 g (39,85 %), indiquant une diminution de 3,27 % par rapport au témoin.

Enfin, le mélange M30, contenant 30 % de vase de barrage, présente une perte de masse de 19,66 g (13,93 %) après 60 jours, montrant une réduction significative de 12,88 % par rapport au CM. Après 90 jours, la perte de masse est de 50,26 g (38,02 %), ce qui constitue une diminution de 5,10 % par rapport au mélange témoin. Il est à noter que les mélanges à base de vase du barrage de Beni Harroun résistent mieux à l'attaque de l'acide sulfurique par rapport au témoin.



Figure 33: Echantillons dégradés après immersion à H₂SO₄

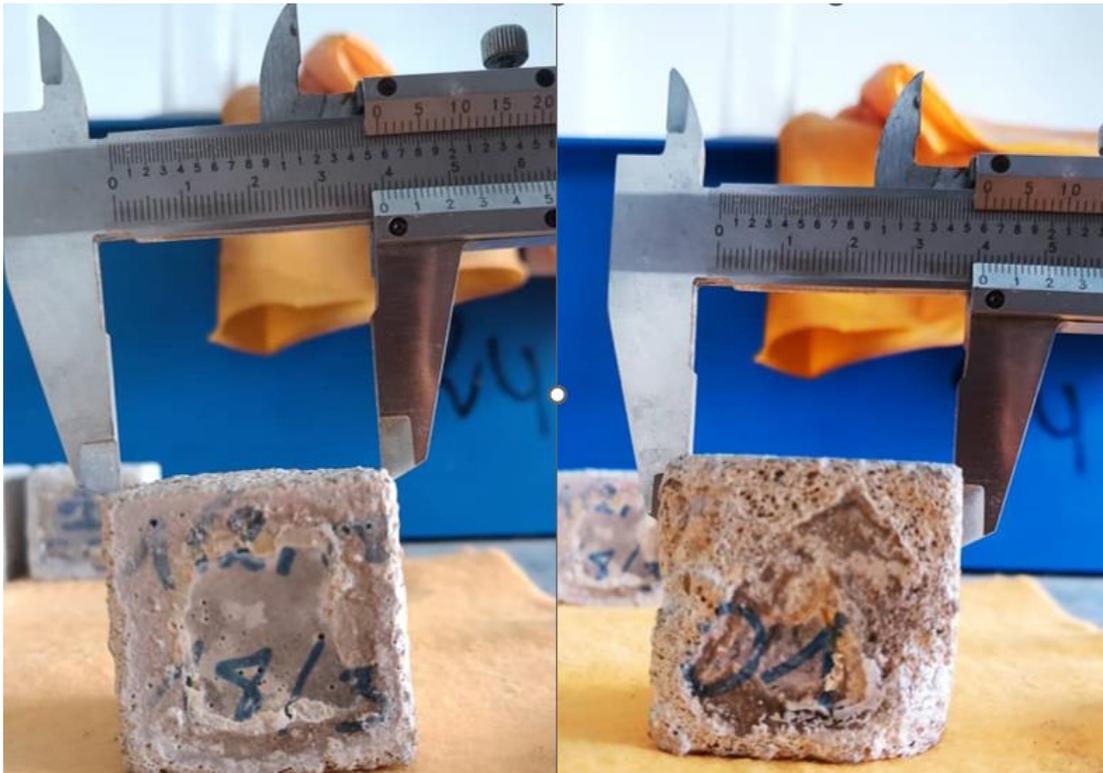
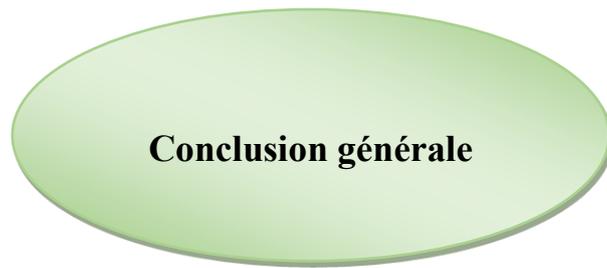


Figure 34: Eprouvettes dégradées après immersion à H₂SO₄

4. Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre permettent de mieux comprendre les effets de l'incorporation de vase de barrage dans les mélanges de béton, en termes de propriétés d'étalement, de résistance à la compression, de vitesse ultrasonique (UPV), et de perte en poids (attaque chimique).

L'incorporation de vase de barrage dans les mélanges de béton améliore les performances mécaniques et la durabilité, avec des augmentations notables de la résistance à la compression et de la vitesse ultrasonique, ainsi qu'une meilleure résistance à la perte de masse due à l'attaque acide. Ces améliorations peuvent être principalement attribuées à la réactivité pouzzolanique de la vase et à son taux élevé de SiO₂.



Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au laboratoire de génie civil de l'université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi à Bordj Bou Arreridj.

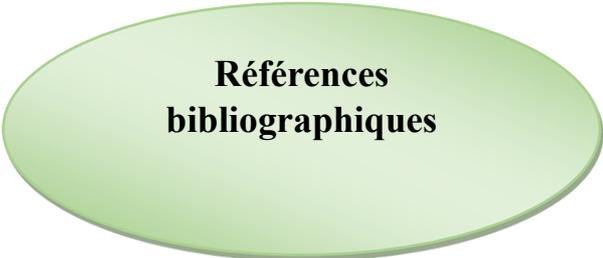
La protection de l'environnement est une priorité essentielle dans les recherches actuelles. Bien que des progrès aient été réalisés dans la production de ciment, celle-ci demeure une source importante de pollution. Il est important de diminuer la production de ciment en adoptant des matériaux moins polluants ou en remplaçant partiellement le ciment par des produits recyclés issus d'écoproduits ou de géo-déchets, afin de fabriquer des bétons et mortiers à haute performance. L'ajout d'additions minérales est devenue une méthode clé pour améliorer des propriétés telles que la fluidité, la résistance et la durabilité des bétons et mortiers.

L'objectif principal de cette étude était d'explorer la possibilité de substituer partiellement le ciment par de la vase de barrage de Séd Beni Haroun dans des proportions de 10 %, 20 % et 30 %, et d'évaluer les performances des mélanges obtenus en termes de maniabilité, résistance à la compression, vitesse ultrasonique et perte de masse en milieu acide.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- L'incorporation de la vase de barrage dans les mélanges a entraîné une diminution de l'étalement. Cette diminution est attribuée à l'absorption d'eau par la vase calcinée.
- L'incorporation de vase de barrage a amélioré les performances mécaniques en montrant à 7, 28 et 90 jours une augmentation jusqu'à 26 % 35% et 24% par rapport au témoin respectivement.
- La réactivité pouzzolanique de la vase de barrage montre une tendance générale d'augmentation de la vitesse ultrasonique
- En ce qui concerne la perte en poids après éersion a l'acide sulfurique H₂SO₄, les résultats montrent que les mélanges à base de vase du barrage de Beni Harroun résistent mieux à l'attaque de l'acide sulfurique par rapport au témoin.

En conclusion, l'incorporation de la vase de barrage de Séd Beni Haroun dans les mélanges de ciment a démontré des améliorations significatives en termes de résistance à la compression et de durabilité, avec une réduction notable de la perte de masse en milieu acide. Ces résultats indiquent que la vase de barrage peut être un substitut viable au ciment, contribuant ainsi à la valorisation des déchets et à la réduction de l'impact environnemental de l'industrie du ciment.



**Références
bibliographiques**

Bibliographie

- [1] Z. Khadidja, «Etude du mode de fabrication du ciment et effet des matières premières- Impact de l'utilisation du ciment sur l'environnement,» *Mémoire de Magister, Université Hassiba Benbouali de Chlef*, p. 42, 2011.
- [2] F. J. A. J. P. G. L. A. P. DUXSON P., «Geopolymer technology: the current state of the art,» *J. Mater. Sci.*, p. 42, 2007.
- [3] D. s, *Geopolymer Chemistry and Applications*, third ed, France, 2011.
- [4] B. A. A. N.-e. N.-e. H. H. Z. Ziregue, «La Vase Calcinée des Barrages autant qu'addition substituable partiellement au ciment : comportement vis-à-vis de l'Attaque de l'Acide Chloridrique,» 2022.
- [5] J. R. e. B. A. CHAID R., « Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons,» *Lebanese Science Journal* , vol. 11, n° %11, p. 2010.
- [6] B. Lahcen, «Fonctionnalisation Des Minéraux Argileux D'origine Marocaine Par Tio₂ En Vue De L'élimination Par Photocatalyse De Micropolluants Organiques Des Milieux Aqueux,» *université de Toulouse*, p. 32, 2012.
- [7] B. D. O. KECHKAR Chiraz, «L'influence d'un ajout minéral sur les performances des matériaux cimentaires,» 2022.
- [8] M. S. E. G. N De Belie, *Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials*, 2018.
- [9] M. C. M. H. A. C. S. H. Khan, «Effect of silica-fume content on performance of CaCO₃ whisker and basalt fiber at matrix interface in cement-based composites ,» *Construction and Building Materials*, vol. 300, n° %1124046 ., 20 September 2021.
- [10] B. N. LARIBI Islam, *Valorisation des déchets dans le béton auto plaçant*, 2020.
- [11] T. Z. OUDJIT Med Nadir, «Élimination de bleu de méthylène par un matériau naturel.,» 2021.
- [12] M. Chen, « Faisabilité technique et environnementale de l'utilisation dans des matériaux de construction cimentaires de cendres d'incinération de boues de station d'épuration,» 2012.
- [13] N. N. BELHOCINE AIDA, « Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux,» p. 16., 06/2014.
- [14] Q. W. ., C. X. e. a. J. Dai, «L'effet de la finesse sur l'indice d'activité d'hydratation du laitier de haut fourneau granulé broyé ,Matériaux,» vol. 12(18), p. 2984., 2019.
- [15] B. N.-e. N.-e. F. F. A. A. H. A. MesbahH., «Etude du comportement d'un béton

Références bibliographiques

- autoplaçant à base de vase de dragage vis-à-vis du retrait,» 2014.
- [16] K. N. N. Benyekhlef KaraBenyekhlef, «Mesures Préventives Contre l’Envasement des Barrages en Algérie,» June 2014.
- [17] R. B. R. e. M. F. Z. M. F. Z. Boualem, « « BOUKOURDANE (ALGERIE) : UN BARRAGE RESERVOIR QUI S'ENVAISE PEU. »,» *Journal LARHYSS*, Vols. %1 sur %249-65., p. 15, 2018.
- [18] R. J. FOUCAULT A., «Dictionnaire de géologie, Paris: . Editions Masson, 1980.
- [19] S. G, ««Le curage des sédiments des cours d’eau »,» *Le courrier de l’environnement de l’INRA*, vol. 43, pp. 146-147, 2001.
- [20] M. S. V. A. BERTREAU I., « « Le curage des cours d’eau lorsque les sédiments contiennent des éléments-traces toxiques »,» *Le courrier de l’environnement de l’INRA*, vol. 20, pp. 27-35, 1993.
- [21] A. D. L’EAU, « « Méthode de gestion et de réutilisation des sédiments pollués »,» *Inventaire détaillé des techniques de curage, transport, traitement et usage des sédiments*, Vols. %1 sur %2 <http://www.eau-artoispicardie.fr/>., 2002.
- [22] M. B. ., M.-A. C. Riad Ali Halassa, «Mise en Valeur de la Boue de Dragage des Barrages Envasés dans le Domaine de Génie Civil : Quelques Exemples Algériens,» *The national conference on Energy Systems, Environment, Plasma and Materials "ESEPM2020"*, MESTEL Laboratory, University of Ghardaia, 2014.
- [23] N. E. B. ., M. H. B. Z. Abdelkadir Belghit, «La Vase Calcinée des Barrages autant qu’addition substituablepartiellement au ciment : comportement vis-à-vis de l’Attaque del’Acide Chloridrique,» 2022.
- [24] L. L. L. S. S. B. Benazzouk, «Évaluation de la durabilité des mortiers pouzzolaniques exposés à une attaque chimique,» *J. Mater. Environ. Sci.*, 2016.
- [25] ASTM C267, « “Chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer Concretes”. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials (ASTM) International,» 2001.
- [26] P. L. V. C. e. a. A. o. e.-f. a. a. i. a.-a. m. A. r. J. B. E. 2. Mendes BC et 3. doi:10.1016/J.JOBE.2020.102010.
- [27] «. E. d. m. d. f. d. c. e. e. d. m. ZOUAI Khadidja.
- [28] «BARKAT Mohamed, « Effets Des Additions Minérales Et Adjuvants Fluidifiants Sur».
- [29] F. J. A. J. P. G. L. A. P. J. V. DUXSON P..
- [30] G. C. a. A. t. e. I. o. DavidovitJ. s.

Références bibliographiques