

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université d'Ain-Temouchent Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et Travaux Publics



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
Filière : TRAVAUX PUBLICS
Spécialité : VOIES ET OUVRAGES D'ART
Thème

**Influence des paramètres de formulation sur les propriétés physiques et
mécaniques des mortiers à base des sédiments de barrage de SEKKAK**

Présenté Par :

DJELLALI Fariel Manel & SEDJAI Houda

Devant le jury composé de :

Dr GUELLIL Mustapha	Président
Dr MAAROUF Hafida	Examinatrice
Dr KAMECHE Zine el-abidine	Encadrant

Année universitaire 2020/2021

REMERCIEMENTS

Au nom d'Allah Clément et Miséricordieux !

*Après avoir rendu grâce à Dieu le tout puissant, le bienveillant, maître des temps
et des circonstances car sans lui rien n'est possible.*

*Nous souhaitons tout d'abord remercier monsieur **KAMECHE Zine El-
Abidine** qui a accepté de nous encadrer, de nous avoir encouragé et soutenus.*

*On lui exprime en toute sincérité notre gratitude pour sa patience, sa
disponibilité et sa confiance durant la réalisation de ce travail de fin d'études.*

Ses conseils nous ont été des plus précieux.

*Aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'assister et d'avoir accepté la
lourde tâche d'examiner notre travail.*

*Nous voudrions également exprimer nos remerciements sincères au personnel
du Laboratoire de Génie civil de l'université de Belhadj Bouchaib*

Ain-temouchent.

*Enfin, nous tenons également à remercier tous les enseignants qui ont contribué
à notre formation, qui ont accepté de répondre à nos questions durant toute la
Période de ce mémoire.*

Sommaire

RESUME	VI
ABSTRACT	VII
ملخص	VIII
LISTE DES ABREVIATIONS	IX
INTRODUCTION GENERALE.....	XIII
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	15
I.1. INTRODUCTION.....	16
PREMIERE PARTIE : L'INDUSTRIE CIMENTAIRE.....	16
I.2. LE CIMENT ET SA FABRICATION.....	16
<i>I.2.1. Brève histoire sur le ciment.....</i>	<i>16</i>
<i>I.2.2. Différents processus de fabrication du ciment</i>	<i>17</i>
<i>I.2.3. Fabrication du ciment.....</i>	<i>17</i>
I.3. STATISTIQUES SUR LA PRODUCTION DU CIMENT EN ALGERIE	18
I.4. LES EMISSIONS ATMOSPHERIQUES DANS L'INDUSTRIE DU CIMENT	18
<i>I.4.1. Poussières.....</i>	<i>18</i>
<i>I.4.2. Différents gaz rejetés dans l'atmosphère.....</i>	<i>18</i>
<i>I.4.3. Impacts de poussière et les gaz.....</i>	<i>19</i>
DEUXIEME PARTIE : PROBLEMATIQUE DE L'ENVASEMENT DES BARRAGES	20
I.5. LES SEDIMENTS DE DRAGAGE	20
<i>I.5.1. Causes et origine de l'envasement</i>	<i>20</i>
I.6. DEFINITION DE LA VASE	21
<i>I.6.1. Constitution des sédiments.....</i>	<i>22</i>
I.7. L'UTILISATION DE LA VASE CALCINEE DANS LA FORMULATION DES BETONS ET MORTIERS	22
<i>I.7.1. Résistance à la compression</i>	<i>22</i>
I.8. LE DRAGAGE	24
<i>I.8.1. Valorisation des sédiments de dragage.....</i>	<i>25</i>
I.9. PRESENTATION DU BARRAGE DE SEKKAK	25
I.10. CONCLUSION.....	26
CHAPITRE II :MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPERIMENTALE ..	28
II.1. INTRODUCTION	29
II.2. LES MATERIAUX UTILISES	29
<i>II.2.1. Le ciment.....</i>	<i>29</i>
<i>II.2.2. Les granulats.....</i>	<i>35</i>
<i>II.2.3. La Vase du barrage de SEKKAK</i>	<i>38</i>

II.2.4. Préparation des éprouvettes.....	39
II.2.5. Mesures expérimentales.....	41
II.3. CONCLUSION.....	47
CHAPITRE III: ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS	49
 III.1. INTRODUCTION	50
 III.2. INFLUENCE DE LA VASE DU BARRAGE DE SEKKAK SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DES MORTIERS ETUDIES	50
III.2.1. La résistance à la traction par flexion	50
III.2.2. La résistance à la compression simple	51
III.2.3. Le module d'élasticité (E_c)	53
III.2.4. Calcul des paramètres mécaniques à partir de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (UVP).....	55
 III.3. INFLUENCE DE LA VASE DU BARRAGE DE SEKKAK SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES DES MORTIERS ETUDIES	60
III.3.1. La Sorptivité capillaire	60
III.3.2. La porosité accessible à l'eau	63
 III.4. RELATION ENTRE LA POROSITE ET L'ABSORPTION CAPILLAIRE DU MORTIER	64
 CONCLUSION GENERALE :.....	65

Liste des tableaux :

<i>Tab. II-1. Analyse chimique du ciment.</i>	29
<i>Tab. II-2. Composition minéralogique du ciment (de Bogüe).</i>	29
<i>Tab. II-3. Procédure du malaxage de la pate du ciment</i>	30
<i>Tab. II-4. Temps de prise des différents pates du ciment</i>	32
<i>Tab. II-5. Caractéristiques physiques du ciment CEM II/42.5.</i>	35
<i>Tab. II-6. Caractéristiques physique du sable concassé (0-4mm).</i>	38
<i>Tab. II-7. Analyse chimique de la vase calcinée.</i>	39
<i>Tab. II-8. Caractéristiques physiques de la vase calcinée.</i>	39
<i>Tab. II-9. Les différentes compositions des mortiers étudiés.</i>	40
<i>Tab. II-10. Type de mortier selon le temps de maniabilité.</i>	41
<i>Tab. III-1. Corrélation entre la vitesse du son et la qualité du mortier [41]</i>	55

Liste des figures :

<i>Fig. I-1. Évolution de l'envasement des barrages en Algérie[22]</i>	21
<i>Fig. I-2. Processus d'envasement d'un barrage[18]</i>	21
<i>Fig. I-3. Résistance mécaniques de quatre pâtes avec différents pourcentages de la vase du barrage de Fergoug [28]</i>	23
<i>Fig. I-4. Résistance à la compression des mortiers [28]</i>	24
<i>Fig. I-5. Engin mécanique de dragage [31]</i>	24
<i>Fig. I-6. Localisation du barrage de SEKKAK.</i>	26
<i>Fig. II-3. Consistance des différentes pates de ciments testés</i>	32
<i>Fig. II-17. Essai ultrasonique.</i>	47
<i>Fig. III-19. Evolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps</i>	49
<i>Fig. III-20. La sorptivité capillaire des mortiers étudiés</i>	49
<i>Fig. III-21. Influence de la vase du barrage de SEKKAK sur la porosité des mortiers étudiés.</i>	50
<i>Fig. III-22. Evolution de la sorptivité en fonction de la porosité des mortiers testés.</i>	52
<i>Fig. III-23. Relation entre la porosité et l'air occlus.</i>	53

Résumé

Notre travail consiste en premier lieu en la valorisation de la vase du barrage SEKKAK en vue d'une possible élaboration d'un éco matériaux avec des performances similaires au ciment ordinaire. Puisque les conditions environnementales actuels incitent de plus en plus à l'élaboration des mortiers éco-respectueux, le but de cette recherche étant d'étudier l'influences des caractéristiques de l'ajout minérale.

Le but de notre recherche est d'étudier expérimentalement l'influence de différente concentration de sédiments dragué et traité autant que substitue minéral au ciment CEMII/A 42.5 dans la composition d'un mortier. Il s'agit de comparer l'incorporation de cette vase calcinée dans un mortier à un mortier témoin. Cela nous a donc menées à six mortiers à différents composition, en premier lieu une substitution de pourcentages de 5, 10, 15, 20 et 25% de la vase calcinée et un mortier sans ajouts pour le besoin de comparaison. Un des objets principaux de ce travail est de comparer entre les résultats des résistances mécaniques obtenus par des essais destructifs et non destructifs tels que l'essai ultrasonique. Des essais complémentaires de la mesure de l'absorption capillaire et de l'air occlu ont été aussi effectués ainsi que des essais pour déterminer les propriétés physiques et mécaniques à l'état frais et durci.

Outre l'intérêt économique que présente un mortier à base de vase calcinée, notre étude à monter que ce dernier présente des performances très comparable à celles obtenus sur des mortiers témoins.

Mots clés: valorisation, la vase calcinée, barrage SEKKAK, mortier, ciment, substitution.

Abstract

Our work consists first of all in the valorization of the mud of the SEKKAK dam in view of a possible elaboration of an eco cement with performances similar to the ordinary cement. Since the current environmental conditions encourage more and more the elaboration of eco-respectful concrete and mortars, the aim of this research is to study the influence of the characteristics of the mineral addition.

The purpose of our research is to study experimentally the influence of different concentrations of dredged and treated sediments as well as mineral substitutes for CEMII/A 42.5 cement in the composition of a mortar. The aim is to compare the incorporation of this calcined silt in a mortar to a control mortar. This has led us to six mortars with different composition, first a substitution of percentages of 5, 10, 15, 20 and 25% of the calcined sludge and a mortar without additions for the need of comparison. One of the main objects of this research work is to compare the results of the mechanical strength obtained by using destructive and non-destructive tests such as the ultrasonic test. Complementary tests of capillary absorption and occluded air measurements were also carried out, as well as tests to determine the physical and mechanical properties in the cool and hardened state.

In addition to the economic interest that presents a mortar based on calcined silt, our study has shown that the latter presents performances very comparable to those obtained on control mortars.

Keywords : valorization , the mud, SEKKAK dam, mortar, cement, substitution

ملخص

ويتألف عملنا في المقام الأول من تحديد قيمة الرواسب المحترقة لسد سكاك بغية إمكان بلورة أسمنت بيئي بأداء مماثل للأسمنت العادي. وبما أن الظروف البيئية الراهنة تشجع بصورة متزايدة على تطوير الخرسانة و الملاط الصديقة للبيئة ، فإن الهدف من هذا البحث هو دراسة تأثيرات خصائص إضافة المعادن.

الهدف من بحثنا هو الدراسة التجريبية لتأثير تراكيز مختلفة من الرواسب المجففة والمعالجة وكذلك البديل المعدني للأسمنت CEMII/A 42.5 في تكوين الملاط. إنها مسألة مقارنة دمج الرواسب المحترقة في الملاط مع ملاط شاهد. وهذا أدى بنا إلى ست ملائط ذات تراكيب مختلفة ، أولاً استبدالها بنسبة 5 ، 10 ، 15 ، 20 و 25% من الرواسب المحترقة و ملاط بدون إضافات لغرض المقارنة. و من أهم الأهداف الرئيسية لهذا العمل هو مقارنة نتائج المقاومة الميكانيكية التي يتم الحصول عليها عن طريق تجارب مكسرة أو غير مكسرة مثل اختيار الموجات فوق الصوتية كما أجريت اختبارات أخرى مثل قياس الامتصاص الشعيري و الهواء المغطى.

وبالإضافة إلى المصلحة الاقتصادية للملاط القائمة على الرواسب المحترقة ، تبين دراستنا أن هذه الأخيرة لها أداء مماثل جدا لتلك التي تم الحصول عليها على الملاط الشاهد.

الكلمات المفتاحية : تقييم . الرواسب المحروقة. سد سكاك .الملاط.الاسمنت .الاستبدال.

Liste des abréviations :

SiO_2	Silice.
Al_2O_3	Oxyde d'Alumine.
SO_3	Sulfates.
$CaCO_3$	Carbonates.
CO_2	Anhydride carbonique.
C_3A	Aluminate tricalcique.
C_4AF	Alumino ferrite tétracalcique.
Fe_2O_3	L'oxyde de fer.
H_2O	L'eau de combinaison.
E	Eau.
C	Ciment.
S	Sable.
E/C	Rapport eau / ciment.
LTPO	Laboratoire des travaux publics Ouest.
H_2O	L'eau de combinaison.
M_f	Module de finesse.
PT	Pate témoin.
PVC	Pate vase calcine.
ρ_{app}	Masse volumique apparente.
ρ_{abs}	Masse volumique absolue.
S_{sb}	Surface spécifique Blaine.
t	Temps mesuré en secondes.
M	La masse sèche du matériau, en (kg).
V	Représente le volume du récipient, en (m ³).
h_1	Hauteur totale.
h_2	Hauteur de granulat.
ES	Equivalent de sable.
S_{sp}	Surface spécifique Blaine.
C_u	Coefficient d'uniformité.
C_c	Coefficient de courbure.
MT	Mortier témoin.
V	Vase.
M_{sat}	Masse saturée immergé.
M_{sec}	Masse sèche.

ε

La porosité.

i

Indice d'activité

E_C

Module d'élasticité

R_C

Résistance en compression

R^2

Coefficient de régression

Introduction générale

L'Algérie compte à l'heure actuelle (en 2021) 129 Barrages d'eau, le taux d'approvisionnement en eau potable avoisine les 77 % à travers le pays. Sauf que le taux de remplissage est estimé à 44,6 % à cause de plus de 30 millions de m³ des sédiments qui se déposent annuellement au niveau des retenues de barrages Algériens dont une dizaine d'entre eux sont gravement menacés par l'envasement [1-2]. L'opération de dévasement est donc inévitable actuellement afin de prolonger la durée de vie de ces barrages envasés. Ainsi, les quantités de sédiments retirés par l'opération de dragage sont déposées en aval des ouvrages (de la digue du barrage), ce qui constitue un véritable danger sur l'environnement. Car sur le long terme, ces sédiments peuvent conduire à la pollution du milieu rural dans la région en aval de barrage. Alors, afin de contribuer à la résolution de ce problème, la récupération et la réutilisation des sédiments de dragage s'avère une opération de très grand intérêt. Une valorisation de ces sédiments est donc nécessaire avant de pouvoir les réutiliser, principalement dans le domaine de génie civil.

Par ailleurs, le secteur de l'industrie cimentaire atteint une production annuelle impressionnante en Algérie ; hélas lors des différentes étapes de production du ciment, les fortes émissions de gaz à effet de serre (CO₂) et la consommation d'énergie et de combustibles très importante dans les cimenteries, influent sur l'aspect économique dans ce secteur et plus encore sur l'environnement.

D'après plusieurs travaux de recherche, la fabrication des matériaux cimentaires, tels que les bétons et les mortiers, l'utilisation des ajouts pouzzolaniques (ajoutés par substitution d'une quantité du ciment) permet de réduire la consommation du clinker (obtenu par la cuisson des matières première à 1450° C) nécessaire pour la fabrication du ciment. Ce qui conduit finalement à une réduction dans la consommation énergétique et par conséquent à une production nettement moins onéreuse. En effet, les avantages de cette substitution d'une quantité du ciment par des ajouts pouzzolaniques sont comme suit :

- Réduction des volumes de déchets dans la nature et les décharges principalement,
- Diminution des volumes d'extraction des carrières et gisements,
- Economie d'énergie.

L'objectif principal dans ce travail de recherche est de valoriser la vase prélevée du barrage de SEKKAK, situé dans la wilaya de Tlemcen, en vue de l'utiliser comme substituant d'une quantité du ciment nécessaire pour la fabrication des mortiers. Dans le but d'atteindre l'objectif de cette étude, la vase prélevée du barrage de SEKKAK est traitée et transformée en une poudre finement broyée avant d'être utilisée comme ajout pour la composition d'un nouveau mortier. En plus des

buts cités plu-haut, tels qu'une économie en consommation énergétique dans l'industrie cimentaire et une réduction dans les émissions des gaz à effet de serre comme le CO₂, Cette étude vise aussi à optimiser les capacités de réserve en eau dans les barrages en Algérie.

Afin d'atteindre les objectifs cités ci-dessus, l'organisation de ce mémoire suit la démarche adoptée lors de notre recherche.

Dans un **premier chapitre** de ce mémoire une synthèse bibliographique est présentée, dans laquelle, toutes les avancées concernant le ciment et l'impacte de l'industrie cimentaire sur l'environnement sont résumées dans une première partie. Tandis que la deuxième partie de cette synthèse illustre la problématique de l'envasement et l'importance du traitement des sédiments dragués.

Dans le **deuxième chapitre** de ce document, une description des matériaux utilisés est donnée en détail, ainsi que les formulations (les compositions) adoptés pour les différents mortiers étudiés dans ce travail de recherche ((formulations avec un rapport E/L fixé et une quantité variable de la vase (ajoutée par substitution)). Dans ce chapitre, les méthodes des essais effectués dans notre compagne expérimentale, et qui nous ont permis de mesurer toutes les grandeurs physiques et mécaniques des mortiers testés, sont aussi présentées.

Le **troisième chapitre** de ce mémoire présente les résultats obtenus par ce travail de recherche expérimental et leurs analyses sous l'effet de l'ajout pouzzolanique étudié (la vase du barrage de SEKKAK), dont certaines relations sont données entre des résultats obtenus à l'état frais et d'autres à l'état durci des six mortiers testés dans cette étude.

À la fin de ce mémoire, des conclusions sont présentées par rapport à l'utilisation de la vase du Barrage de SEKKAK comme ajout pouzzolanique (substituant d'une quantité du Ciment) dans les mortiers ordinaires. Des perspectives sont aussi données, à la fin de ce document, correspondant à l'étude de l'influence de cette vase sur le comportement microstructural de différents matériaux cimentaires.

CHAPITRE I :

Synthèse bibliographique.

I.1. Introduction

Le ciment, élément essentiel à la production des mortiers et des bétons, est la deuxième matière la plus utilisée dans le monde après l'eau. En Algérie, les 17 cimenteries réparties dans le territoire national avec une production de plus de 22 millions de tonnes en 2016 [3], sachant que le CO₂, un gaz à effet de serre, émis lors de la calcination du calcaire ou autrement dit: lors de la fabrication du Clinker, pourrait être diminué en limitant la production du ciment (principalement du Clinker). Pour ce faire l'utilisation des sédiments des barrages d'eau serait une solution théoriquement possible.

Première partie : L'industrie cimentaire

I.2. Le ciment et sa fabrication

Le ciment, une matière pulvérulente à base de calcaire et de l'argile formant avec l'eau ou une solution saline une pâte plastique liante capable d'agglomérer en durcissant. Cette pâte de ciment peut atteindre en quelques jours sa résistance maximale et la conserver même sous l'eau [4].

I.2.1. Brève histoire sur le ciment

Les ciments auraient en premier lieu été découverts par les Égyptiens puis perfectionnés par les civilisations suivantes par l'utilisation de chaux. Les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques de la région de Pouzzoles), usage repris et généralisé par les Romains. Jusqu'à l'Époque moderne, le ciment est un liant, fréquemment une chaux additionnée d'adjuvant comme les tuiles ou les briques concassées dont l'argile a des propriétés hydrauliques. La pouzzolane (terre volcanique de Pouzzoles dans la région de Naples en Italie) est particulièrement utilisée comme adjuvant. Le ciment ne prend son acception contemporaine qu'au XIX^{ème} siècle, quand Louis Vicat identifie le phénomène d'hydraulicité des chaux en 1817 et celle des ciments[4].

En 1840, la découverte des principes d'hydraulicité des ciments lents (dits actuellement ciments Portland) par Louis Vicat (société Vicat) une cuisson à la température de fusion pâteuse soit 1450° C qui permet d'obtenir le Clinker pour voir une réelle fabrication de ces ciments modernes [5].

La première usine de ciment a été créée par Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne-sur-Mer en France. Le développement n'a pu se faire que grâce à la naissance de matériel nouveaux : four rotatif et broyeur à boulets surtout. Les procédés de fabrication se peaufinèrent sans cesse : en

1870, pour produire une tonne de Clinker il fallait 40 heures, aujourd'hui, il faut à peu près 3 minutes seulement [5].

1.2.2. Différents processus de fabrication du ciment

1.2.2.1. Voie sèche

La fabrication du ciment par voie sèche est la technique la plus employée dans le monde, aujourd'hui. La matière première est préparée sous forme de poudre. La pré-homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des constituants essentiels du ciment, par superposition de multiples couches. Une station d'échantillonnage analyse régulièrement les constituants et le mélange pour en garantir la régularité. À la sortie du hall de pré-homogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre qui présente la finesse requise ; cette poudre, le « cru », est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation [6].

1.2.2.2. Autres techniques de préparation du ciment

D'autres techniques consistent à agglomérer la matière sous forme de granules (voie semi sèche) ou à la transformer en une pâte fluide (voie semi-humide ou humide). La voie humide est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d'énergie.[7]

Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42 % d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 m de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herses [4-5].

La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Ce mélange est appelé le cru. Des analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson. La pâte est ensuite envoyée à l'entrée d'un four tournant, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure [9].

1.2.3. Fabrication du ciment

Les matières premières qui rentrent dans la fabrication du Ciment sont essentiellement de Calcaire (majoritairement composé de carbonate de calcium CaCO_3) et d'Argile (un mélange complexe et souvent hydraté de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde ferrique (Fe_2O_3)). Ces deux principales matières sont en proportion respective moyenne de 80 % et 20 % [10].

Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps. Mais si elle peut varier d'une cimenterie à l'autre en

fonction de la qualité du gisement exploité, la composition du cru reste dans des proportions bien définies [4] :

- Carbonate de calcium (CaCO_3) : de 77 à 83 %
- Silice (SiO_2) : de 13 à 14 %
- Alumine (Al_2O_3) : de 2 à 4 %
- Oxyde ferrique (Fe_2O_3) : de 1,5 à 3 %

I.3. Statistiques sur la production du ciment en Algérie

En 2021 la production du ciment a explosé tout les records des années passés, la production du ciment en Algérie est passée de 22 millions de tonnes en 2017 à plus de 40 millions de tonnes cette année [11]. Quant au groupe industriel GICA, il détient 50 % de la capacité de production avec un volume dépassant 11 millions de tonnes en 2020 et pourrait augmenter pour atteindre près de 17 millions de tonnes en 2021, ce qui fait du complexe un leader dans l'industrie du ciment en Algérie [12].

Selon les prévisions rendues publiques par le ministère de l'Industrie et des mines, l'excédent dans la production du ciment devrait atteindre entre 10 et 15 millions de tonnes, ce qui permettra, de porter les exportations de ce matériau de construction à 500 millions de dollars [13]. Le PDG du Complexe Ciment Biskra, Amouri Laaroussi, a ainsi affirmé que la qualité du ciment algérien et sa conformité aux normes internationales ont incité plusieurs clients à renouveler les contrats d'importation, soulignant dans le même contexte qu'il y a des négociations avancées avec de nouveaux clients [11].

I.4. Les émissions atmosphériques dans l'industrie du ciment

Lors de la production du ciment, différents types de polluants sont rejetés dans l'atmosphère constitués essentiellement de poussières pendant l'extraction et la fabrication du ciment mais surtout des gaz de combustion au niveau des fours de cuisson.

I.4.1. Poussières

Les poussières dégagées dans la région environnante d'une cimenterie représentent la forme de pollution la plus ressentie par la population pour des raisons physiologiques. Leur granulométrie est un facteur important, car la plupart des poussières sont fines et restent en suspension dans l'atmosphère, alors que les plus grosses se déposent sur le sol à différentes distances de la source selon leur taille [14].

I.4.2. Différents gaz rejetés dans l'atmosphère

Les polluants contenus dans les gaz de combustion dépendront de la nature du combustible utilisé (charbon, fuel ou gaz naturel) et de la composition du minerai. Les principaux polluants rencontrés dans l'industrie du ciment sont [15] :

- Le dioxyde de Soufre (SO_2) émis principalement par la combustion au niveau du four et se transforme en SO_3 dans l'atmosphère ;
- L'oxyde d'Azote (NO_2) produit au niveau du four pendant la combustion. Sa formation est favorisée par un excès d'Oxygène, et surtout par la température de la flamme ;
- Le monoxyde de Carbone (CO) produit au niveau du four lorsque la combustion est incomplète ou lorsque le four est mal réglé. Il est très toxique ;
- Le dioxyde de Carbone (CO_2) produit quand la combustion est complète (avec suffisamment d'air) ;
- Le CO_2 est également rejeté durant la calcination suite à la décarbonatation du calcaire contenu dans la matière première .

1.4.3. Impacts de poussière et les gaz

A. Sur la santé humaine

Les effets des poussières sur la santé dépendent essentiellement de trois facteurs :

- Le niveau de concentration auquel est exposé l'organisme (milieux professionnels) ;
- La durée d'exposition ou le temps durant lequel l'ouvrier ou l'habitant est exposé à ce milieu ;
- L'effort physique qui s'accompagne d'une augmentation de la ventilation pulmonaire [6], [16].

Les gaz influe autant eu court terme que sur le long terme :

- Le SO_2 provoque une irritation des muqueuses de la gorge et une inflammation des branches. Quand il est associé aux particules, il peut affecter tout l'appareil respiratoire jusqu'aux alvéoles ;
- Le CO se fixe sur les globules rouges du sang et empêche le transport de l'oxygène vers les cellules. A forte dose, il peut causer une asphyxie mortelle ;
- Le NO_2 est un gaz irritant pour les bronches. Chez les asthmatiques, il augmente la fréquence et la gravité des crises [10].

B. Sur la végétation

- Les poussières déposées sur les plantes les empêchent de respirer et peuvent causer leur mort progressive. À la longue, cela provoque la disparition de toutes les espèces végétales;
- Les différentes études de recherche ont montré que certains rejets chimiques comme le SO_2 , le fluor et le peroxyacétyl nitrate avaient des effets néfastes sur la végétation ;
- Les plantes affectées sont aussi rendues plus sensibles aux infections cryptogamiques, ce qui entraîne avec le temps une réduction du rendement des cultures [17].

Deuxième partie : Problématique de l'envasement des barrages

En Algérie, le phénomène d'envasement des barrages devient très menaçant puisqu'il atteint les valeurs les plus élevées au niveau de l'Afrique du nord [12].

Le phénomène de l'envasement des barrages est l'aboutissement d'un processus naturel d'érosion des bassins versants dont les particules solides sont drainées directement par des cours d'eaux et qui se déposent finalement au fond de la retenue. Les conséquences de cette forte sédimentation sont extrêmement gênantes.[19]

I.5. Les sédiments de dragage

1.5.1. Causes et origine de l'envasement

L'origine de l'envasement se trouve dans le dépôt de particules solides, minérales et organiques sur le fond des retenues. Cet envasement des retenues est lié directement aux phénomènes de l'érosion. Les agents de l'érosion qui sont principalement la pluie, le ruissellement et le vent, ainsi que des facteurs qui vont conditionner les quantités de particules arrachées: caractéristiques des pluies, des sols, de la végétation, de la topographie et enfin les activités humaines [16-17].

Il ressort dans les processus de l'érosion que l'eau est le principal agent moteur. Elle est la cause première de l'altération des roches qui donnent des particules, du détachement et de l'arrachement des agrégats [21].

1.5.2. Étapes de l'envasement d'un barrage

Le processus de l'envasement d'un barrage débute dans la première phase par l'arrachage des particules fines de leurs positions initiales par le ruissèlement. Dans la seconde phase, les sédiments seront drainés par les cours d'eau jusqu'au barrage. Enfin dans la troisième partie, les particules seront piégés pour se décanter et se tasser au fond du lac du barrage [19](voir la **Fig. I-2**).

L'évolution de l'envasement des barrages en Algérie est toujours en croissance depuis la fin de 19^{ème} siècle. À partir de 1970 cette croissance a augmentée plus rapidement pour atteindre un volume de plus de un milliard et demi de mètre cube de la vase en 2020 (voir la **Fig. I-1**).

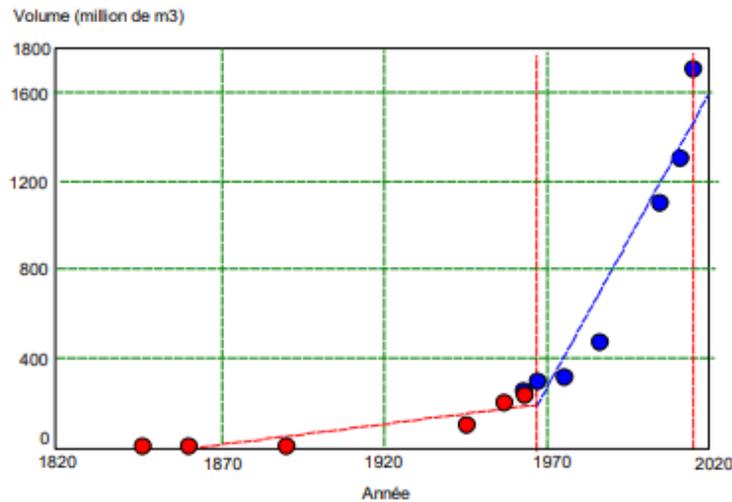


Fig. I-1. Évolution de l'envasement des barrages en Algérie[22]

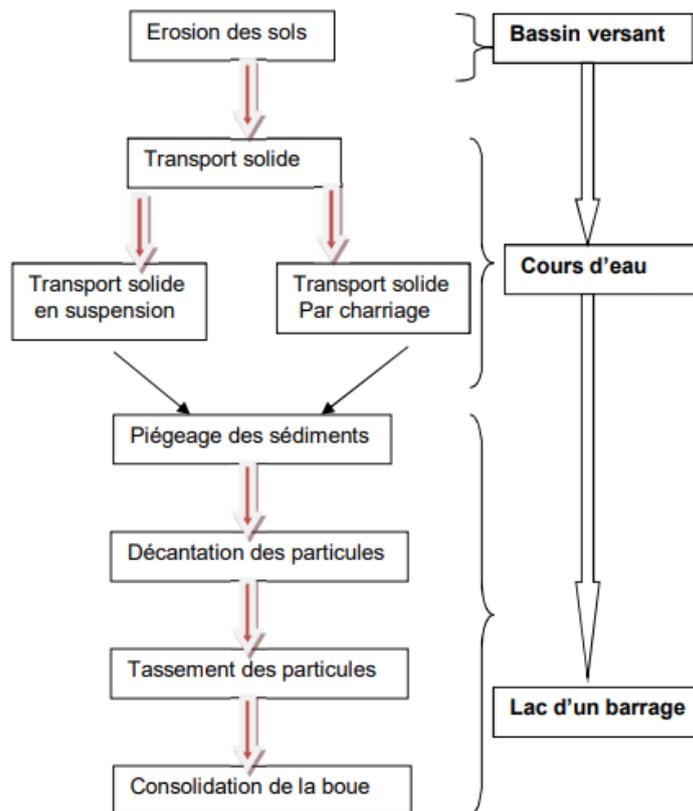


Fig. I-2. Processus d'envasement d'un barrage[18]

I.6. Définition de la vase

Le nom de vase (mot emprunté 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) [24].

Les vases sont des sols contenant plus de 90 % de particules inférieures à 0,2 mm, dont la matière organique M.O 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 [21].

On distingue 2 origines aux sédiments :

- **Origine endogène** : les particules proviennent de la production autochtone du milieu. Il s'agit de débris de macro-phytes comme les plantes aquatiques, les cadavres de micro-phytes et d'animaux [25].
- **Origine exogène** : il s'agit des particules qui sont issues du ruissellement des eaux ou bien transportées par les vents. D'origines naturelles ou anthropiques, elles proviennent de l'érosion des sols, de la décomposition de matière végétale, de l'apport de matière en suspension, matières organiques, de nutriments ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques [26].

1.6.1. Constitution des sédiments

Les vases sont constituées de 4 éléments principaux[25] :

1. La matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates) ;
2. La fraction argileuse (kaolinite, illite ou montmorillonites) ;
3. La fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, acides fulviques et humiques);
4. Une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.
 - L'eau colloïdale qui hydrate les colloïdes ;
 - L'eau adsorbée qui est liée à la surface des particules et constitue un film autour d'elles.

1.7. L'Utilisation de la vase calcinée dans la formulation des bétons et mortiers

1.7.1. Résistance à la compression

Dans le cadre de sa recherche sur l'envasement du barrage de Fergoug, SEMCHA (2006) [28] a démontré que le caractère pouzzolanique de la vase a été mis en évidence à l'aide d'essais mécaniques effectués sur des pâtes durcies confectionnées à partir d'un mélange ciment et vase calcinée à différents pourcentages. Les résultats obtenus étaient plus intéressants, en effet l'optimisation d'un pourcentage approprié a démontré que ce mélange développe des propriétés mécaniques intéressantes (résistance à la compression); notamment pour un taux de 30 % qui

s'avérait très satisfaisant et peut être intéressant pour la fabrication de ciment à moindre coût [29] (**Fig. I-3**).

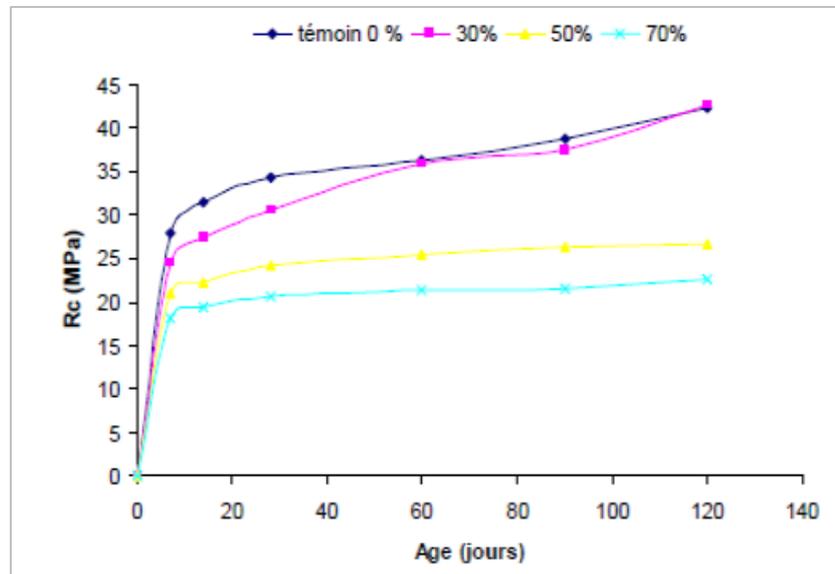


Fig. I-3. Résistance mécaniques de quatre pâtes avec différents pourcentages de la vase du barrage de Fergoug [28]

Les cimenteries algériennes utilisent, pour la production d'un ciment composé de type CEM II de classe élevée, une pouzzolane naturelle. Celle-ci est extraite des carrières dans la région de Béni-Saf (Nord-ouest Algérien). D'après SEMCHA [28] la comparaison des résultats obtenus (**Fig. I-4**) entre la pouzzolane artificielle à base de vase calcinée et la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, a permis de retenir en conclusion les principaux éléments suivants :

- Ces deux matériaux peuvent trouver des applications aussi bien pour la production de ciment composé de type CEM II, que pour la fabrication de liants pouzzolaniques.
- Un meilleur comportement est observé pour la pouzzolane artificielle à base de vase calcinée de barrage de Fergoug: Les résistances en compression des éprouvettes à base de la vase calcinée ont dépassé celles obtenues avec la pouzzolane naturelle de Béni-saf; les deux procédés traduisent un véritable intérêt économique.
- La supériorité des résultats sur la vase calcinée s'explique par une meilleure protection de notre produit de synthèse par rapport au naturel. En effet, les conditions d'extraction à ciel ouvert du gisement de pouzzolane de Béni-Saf ne permettent pas une garantie suffisante vis-à-vis d'impuretés provenant du site même de l'exploitation [28].

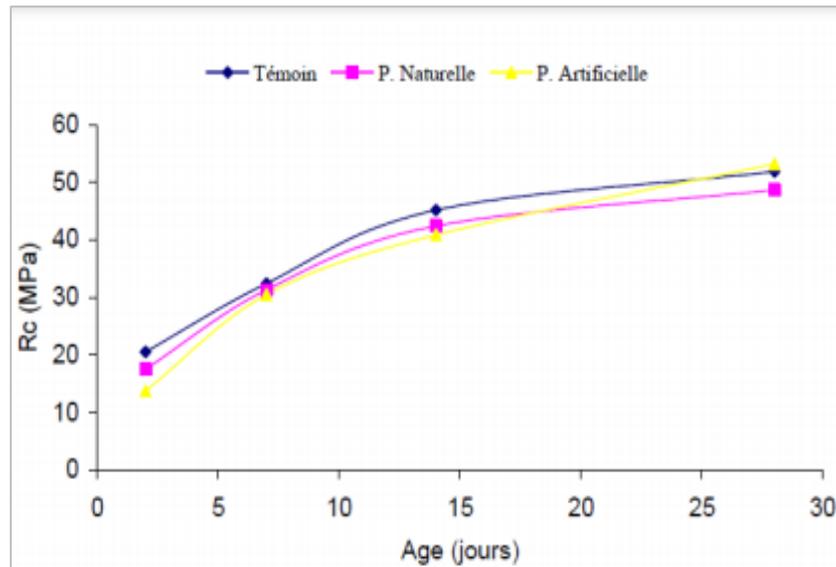


Fig. I-4. Résistance à la compression des mortiers [28]

Plusieurs travaux de recherches ont été réalisés évoquant la possibilité de fabriquer des mortiers et des bétons dont le ciment est composé de vase calcinée utilisant des dosages allant jusqu'à 20 %.

I.8. Le dragage

On appelle dragage l'opération qui consiste à extraire les matériaux situés sur le fond d'un plan d'eau. L'objectif peut être de réaliser des travaux de génie portuaire, d'entretenir les chenaux fluviaux ou maritimes empruntés par les navires lorsqu'ils ont été comblés par les sédiments [30]. La **Fig. I.5** présente une photo d'un engin mécanique de dragage :



Fig. I-5. Engin mécanique de dragage [31]

L'extraction et l'évacuation des sédiments sont les deux phases importantes d'une opération de dragage. En effet, lors de ces phases, les sédiments subissent de nombreuses transformations pouvant modifier leurs caractéristiques et leurs comportements. Ces deux étapes peuvent aussi avoir un impact direct sur l'environnement par la remise en suspension de ces sédiments. Il y a quatre principales techniques de dragage : dragage en eau, dragage hydraulique, dragage mécanique et dragage pneumatique [32], [33].

1. **Les dragages en eau** : consiste à la remise en suspension et la dispersion des sédiments par un courant naturel ou artificiellement entretenu et ils sont éparpillés ou transférés vers une zone définie.
2. **Les dragages hydrauliques** : utilisent des pompes centrifuges, aspirant à travers un tube d'élinde, les sédiments sous forme de boues liquides de haute teneur en eau.
3. **Les dragages pneumatiques** : fonctionnent sur le même principe que les dragues hydrauliques mais avec une aspiration générée par des pompes à air comprimé.
4. **Les dragages mécaniques** : agissent par action mécanique d'un outil (benne, godet) directement sur les matériaux à draguer [27].

La gestion des sédiments dragués se fait suivant 4 grandes filières d'élimination : • le stockage sous eau, • la mise en décharge, • le stockage et • la valorisation.

1.8.1. Valorisation des sédiments de dragage

Dans notre étude, nous nous intéresserons à la valorisation de la vase (des sédiments) issues de dragage dans le barrage de SEKKAK dans le domaine de Génie Civil. Le large éventail de technique et de qualité acceptables pour les matières premières dans le secteur du génie civil et des travaux publics permet aux sédiments de dragage de trouver plus facilement un réemploi.

Dans le domaine du bâtiment, les sédiments issus de dragage peuvent être utilisés pour la fabrication de briques, de mortiers et de bétons de toutes classes de résistance. Dans la route, compte tenu du volume important potentiellement utilisable, ils constituent une voie privilégiée, ils peuvent être utilisés en tant que matériaux pour remblais, couches de forme, assises de chaussées non traités ou traités. Les déchets remplacent ainsi une partie de matériaux traditionnels. Les sédiments traités ayant des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques peuvent être utilisés en tant que liant. Lorsque les sédiments traités sont considérés comme inertes, leur utilisation peut alors être envisagée en tant que granulats [34].

I.9. Présentation du barrage de SEKKAK

Le barrage de SEKKAK, dans la wilaya de Tlemcen, est situé sur l'oued de SEKKAK à la hauteur de Guaadet Boukaben, à environ 1 km du village D'Ain Youcef. Le site du barrage est accessible

à partir des routes de wilaya W-38 et W-71 Il est destiné à l'alimentation en eau potable de la ville de Tlemcen et l'irrigation de la plaine de Hennaya [35] (**Fig I-6**).



Fig. I-6. Localisation du barrage de SEKKAK

Faisant partie des nouveaux barrages mis en exploitation, le barrage de SEKKAK, ainsi que sept autres barrages, peuvent être vulnérable à l'envasement. D'une capacité totale de 561 million de m³, plus de 67 millions de m³ de vases sont déposés au fond de ces barrages en 2014. Sur la base de dernières levées bathymétriques (2004, 2006 et 2014) effectués par l'ANBT sur 70 grands barrages ; Possédant un fort taux d'envasement (supérieur à 1 millions de m³), ces barrages peuvent disparaître à court et à moyen terme si des dispositions de lutte contre l'envasement ne seront pas prises à temps [22].

Le barrage de SEKKAK d'une capacité initial de 27 m³, présente en 2014 soit 10 ans après sa mise en eau un taux de comblement estimé à 11% avec un taux de comblement annuel de 1.1% par an.

I.10. Conclusion

La préservation de notre environnement est une question vivement soulevé durant ces dernières années ; en effet la préservation de nos ressources d'eau en l'occurrence les barrages est une manière d'assurer la prospérité de toute une population ce qui fait du curage la solution parfaite mais qui a des répercutions sur l'environnement en raison de l'absence du traitement des sédiments dragées.

Néanmoins les études récentes démontrent que les secteurs des travaux publics et du bâtiment offrent un moyen de valorisation, peu coûteux, des sédiments issus de dragage et qui menacent l'environnement.

Alors, dans ce qui suit, une étude de valorisation de la vase du barrage de SEKKAK pour la fabrication des mortiers ordinaires est présentée à travers une campagne expérimentale, et par laquelle non seulement les capacités de réserve en eau dans les barrages en Algérie seront optimisées finalement, mais les grandes consommations énergétiques et de combustibles ainsi que les émissions des gaz carboniques peuvent être réduites.

CHAPITRE II :

Matériaux utilisés et méthodes
expérimentale.

II.1. Introduction

L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier l'influence des sédiments traités (vase calcinée) issus de barrage de SEKKAK sur le comportement physique et mécanique du mortier ordinaire. Pour cela, l'identification et la caractérisation des matériaux utilisés sont primordiales puisque les propriétés du mortier vont en dépendre.

Alors, dans ce chapitre, les essais de caractérisation des matériaux composant des mortiers étudiés sont présentés, ainsi que certains modes opératoires sont aussi détaillés. La procédure de préparation et de confection du mortier et les méthodes expérimentales préconisées, ainsi que certains résultats obtenus, principalement à l'état frais du mortier, sont aussi présentées dans ce chapitre.

II.2. Les matériaux utilisés

II.2.1. Le ciment

II.2.1.1. Caractéristiques chimiques du ciment utilisé

Le ciment utilisé, dans ce travail de recherche, est un ciment portland composé CEM II/A 42.5 de la cimenterie de Béni-Saf (Wilaya d'Ain-Témouchent). Les compositions chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans le **Tab. II-1 et II-2**. Les analyses chimiques ont été réalisées dans le Laboratoire des Travaux Publics de la région Ouest à Oran (LTPO).

Tab. II-1. Analyse chimique du ciment.

Composants	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	SO_3
Quantité(%)	4.40	3.30	29.9	62.0	1.02	1.80

À partir de la formule de Bogüe, la composition minéralogique du ciment utilisé est comme suit :

Tab. II-2. Composition minéralogique du ciment (de Bogüe).

Composant	C_2S	C_3S	C_3A	C_4AF
Quantité(%)	40.80	27.40	09.60	10.40

Les résultats montrent que le ciment utilisé (CEM II/A 42.5) se caractérise par une plus faible teneur en Al_2O_3 et par conséquent à une faible teneur en C_3A , ce qui peut conduire à un temps de prise (début et fin de prise) de la pâte du ciment relativement retardé.

II.2.1.2. Caractéristiques physique du ciment utilisé

➤ *Essai de consistance (NF EN 196-3)*

La consistance de la pâte du ciment caractérise sa plus ou moins grande fluidité. L'objectif a pour définir une telle consistance dite « consistance normalisée » à l'aide de « l'appareil de VICAT » muni d'une sonde (**Fig. II-1**).



Fig. II-1. Appareil de VICAT.

Selon la norme **NF EN 196-3**, le malaxage de la pâte du ciment est effectué tel qu'il est indiqué sur le tableau ci-dessous (**Tab. II-3**):

Tab. II-3. Procédure du malaxage de la pate du ciment

Opération	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Malaxage	Raclage de la cuve	Malaxage
Durée	5 < t < 10 sec		90 sec	15 sec	90 sec
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente

Notons que nous avons utilisé dans ce qui suit les notations suivantes pour les différentes pâtes étudiées :

PT : Pâte du ciment témoin CEMII/A 42,5.

P-VC5 : Pâte du ciment CEMII/A 42,5 + 5 % de la vase calcinée.

P-VC10 : Pâte du ciment CEMII/A 42,5 + 10 % de vase calcinée.

P-VC15 : Pâte du ciment CEMII/A 42,5 + 15 % de la vase calcinée.

P-VC20 : Pâte du ciment CEMII/A 42,5 + 20 % de la vase calcinée.

P-VC25 : Pâte du ciment CEMII/A 42,5 + 25 % de la vase calcinée.

Afin de trouver la bonne consistance de la pâte du ciment, nous avons testé plusieurs rapports E/C jusqu'à obtention d'une pâte ayant une consistance de 28 %.

La figure ci-dessous (**Fig. II-2**) montre la variation de la consistance en fonction du rapport E/C.

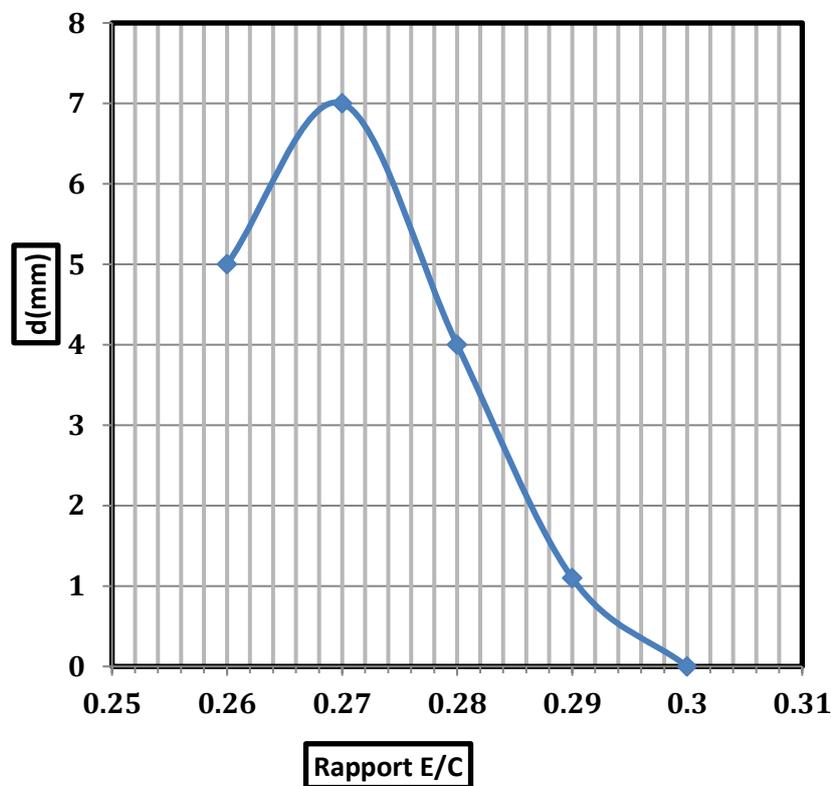


Fig. II-2. Evolution de la consistance en fonction du rapport E/C

On observe tout d'abord que la pâte du ciment témoin avec un rapport E/C allant de 0,28 à 0,30 est trop fluide, pour cela pour les différentes pâtes de vase calcinée un rapport de 0,27 est choisi puisque on a obtenu une consistance normale.

Dans la **Fig. II-3** on trouve les résultats de la consistance des différentes pâtes de vase calcinée afin de pouvoir comparer.

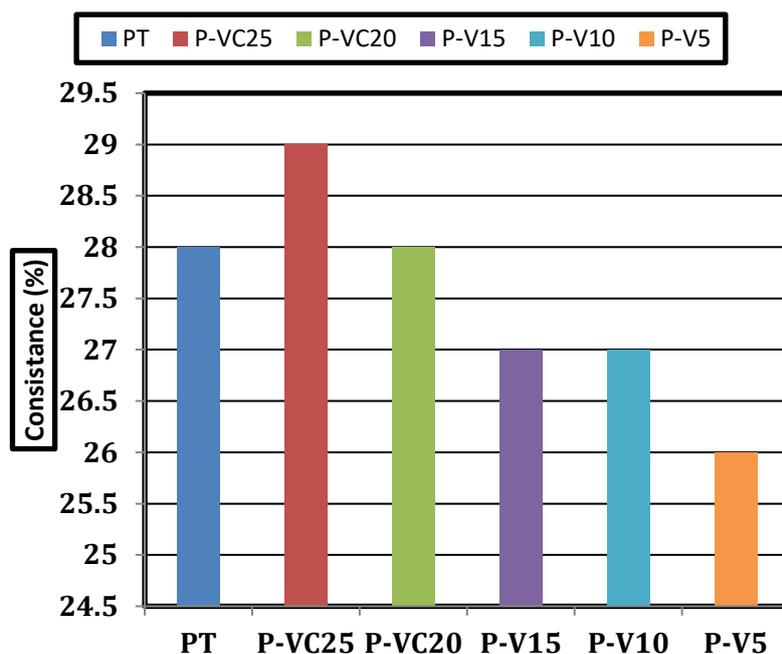


Fig. II-7. Consistance des différentes pâtes de ciments testés

Des résultats on remarque une consistance relativement élevée comparé a celle de la pate témoin, ainsi qu'une diminution de consistance avec la diminution du pourcentage de vase ajoutée cela peut s'expliquer par la supposé absorption d'eau de la vase calcinée.

➤ **Mesure de début et de la fin de prise**

Il est nécessaire de connaître le temps de début de prise des liants hydrauliques en vue de déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre in situ des mortiers et des bétons dont ils sont confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques : Le début et la fin de prise.

Les résultats de l'essai de consistance et de prise sont illustrés dans le tableau ci-dessous (Tab. II-4).

Tab. II-4. Temps de prise des différents pâtes du ciment

Mortiers	PT	PVC5	PVC10	PVC15	PVC20	PVC25
Début de prise	2h45min	2h45min	2h10min	2h35min	2h15min	2h00min
Fin de prise	6h00min	5h12min	4h42min	3h28min	3h15min	2h55min

La figure ci-dessous (**Fig. II-4**) représente la variation du temps de prise des différentes pâtes de ciment testées. Alors, les résultats montrent que le temps de prise diminue avec l'augmentation de la quantité de la vase calcinée ajoutée par substitution dans le liant.

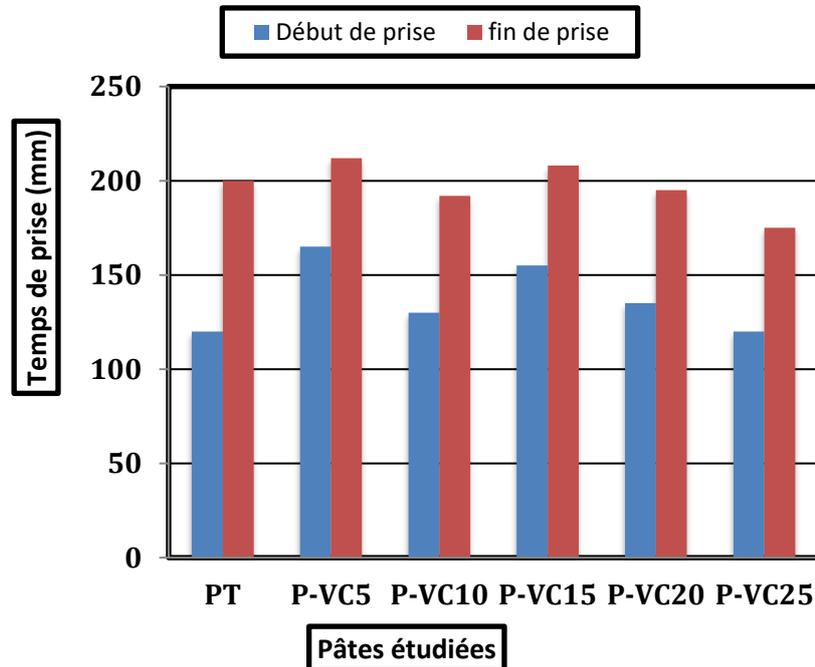


Fig. II-4. Variation du temps de prise des différentes pâtes des ciments étudiés.

➤ **Mesure de la masse volumique apparente du ciment (NF P 18-558)**

L'essai consiste à peser un récipient vide d'un volume (V), puis le remplir sans tassement d'un matériau sec (ciment) et le peser ensuite (M).

La masse volumique apparente, selon la norme **NF P 18-558**, sera déduite de la formule [8]:

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \times 1000 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

- ✓ La masse volumique apparente compacte est déterminée par la pesée d'un récipient d'un litre, rempli de ciment avec un tassement de 25 coups par 3 couches.

➤ **Mesure de la masse volumique absolue du ciment (NF P 18-558)**

La masse volumique absolue est déterminée en utilisant le dispositif Le Chatelier représenté sur la figure ci-dessous (**Fig. II-5**)

La masse volumique absolue est déduite, selon la norme NF P 18-558, de la formule:

$$\rho_{abs} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

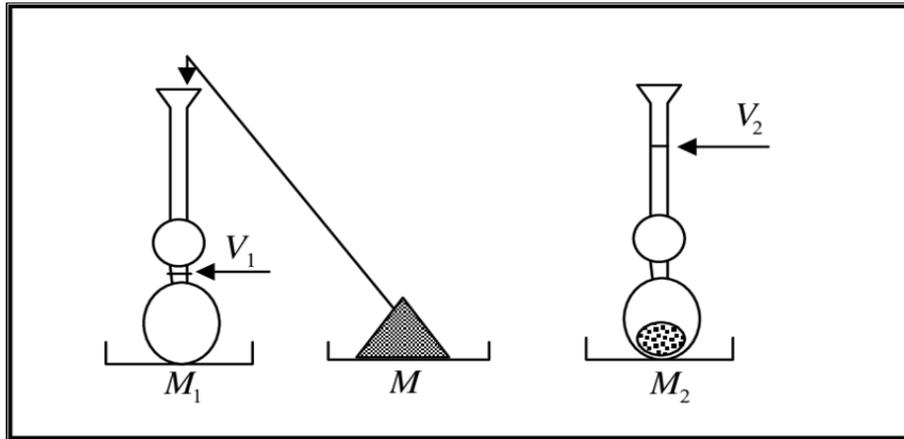


Fig. II-5. Dispositif expérimental de l'appareil le Chatelier.

➤ **Mesure de la surface spécifique Blaine**

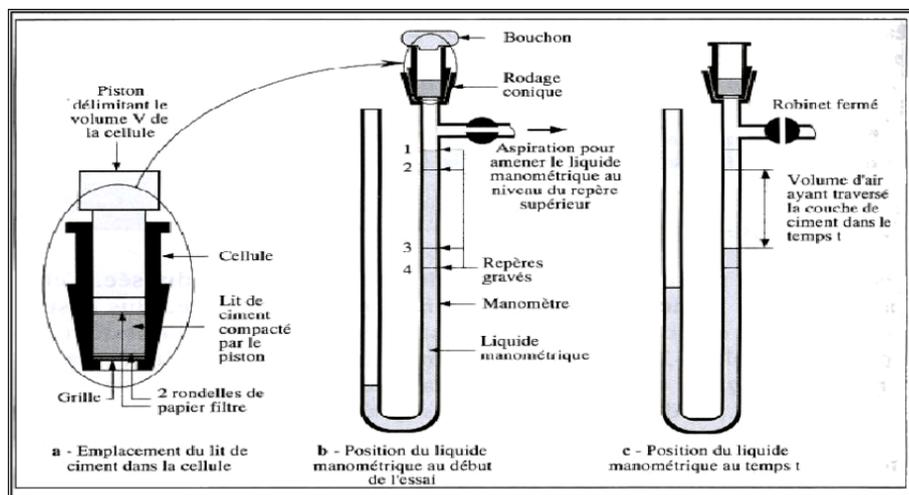


Fig. II-6. Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine.

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse est une caractéristique importante : lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète. La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique : c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en cm^2 de la surface des grains du ciment par gramme de poudre. L'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface [35].

$$S_{sp} = \frac{K\sqrt{n^3}\sqrt{t_0}}{\rho_{abs}(1-n)\sqrt{0,1\eta}} \text{ (g/cm}^2\text{)}$$

Tab. II-5. Caractéristiques physiques du ciment CEM II/42.5.

Masse volumique apparente (g/cm³)	lâche	1.110
	compacte	1.352
Masse volumique absolue (g/cm³)	3.100	
Surface spécifique Blaine (g/cm²)	2660	

Selon les résultats obtenus, les masses volumiques apparente et absolue du ciment utilisé, sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme **NA 231** (Norme Algérienne, 1992), compris entre 0.900 – 1.100 g/cm³ pour la masse volumique apparente et 2.900 – 3.150 g/cm³ pour la masse volumique absolue.

II.2.2. Les granulats

II.2.2.1. Le sable concassé (grossier)

a. Caractéristiques physiques du sable concassé

Pour déterminer les caractéristiques physiques du sable utilisé pour la préparation des mortiers étudiés, des essais de laboratoire doivent être effectués à savoir : l'analyse granulométrique, l'équivalent de sable et les masses volumiques apparente et absolue du sable.

- **Analyse granulométrique du sable selon la norme NF P 18-540**

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série des tamis (de 0.063 à 5 mm), emboîtées les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas.

À partir des résultats de l'analyse granulométrique, le coefficient d'uniformité (C_u), le coefficient de courbure (C_c) et le module de finesse peuvent être déterminés.

Les résultats obtenus (**Fig. II-7**) montrent que la courbe granulométrique du sable (concassé) utilisé s'incère presque parfaitement dans le fuseau idéal pour un bon mortier ordinaire pour la construction.

Notons aussi que le module de finesse calculé ($M_f = 2.7$) selon la norme **NF P 18-540** s'incère dans l'intervalle $2.2 < M_f < 2.8$ recommandé pour la confection de bons mortiers.

➤ Selon la Norme **NF P 18-540**, le coefficient d'uniformité C_u est obtenu par la formule

$$\text{suivante : } C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

D_{60} et D_{10} étant les valeurs lues en abscisse pour les points de la courbe granulométrique correspondant aux ordonnées de 60 % et 10 % de tamis. Les résultats obtenus montrent que $C_u > 3$, Donc la granulométrie du sable utilisé dans cette étude est variée ou encore étalée.

➤ Le coefficient de courbure C_c est déterminé selon la Norme Française **NFP 18-540** par la formule suivante :

$$\frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Puisque le coefficient obtenu $C_c = 1.05$, il est donc inséré dans l'intervalle suivant: $1 < C_c < 3$. Alors, la courbe granulométrique descend d'une façon assez régulière, indiquant ainsi la présence d'une grande variété de diamètres.

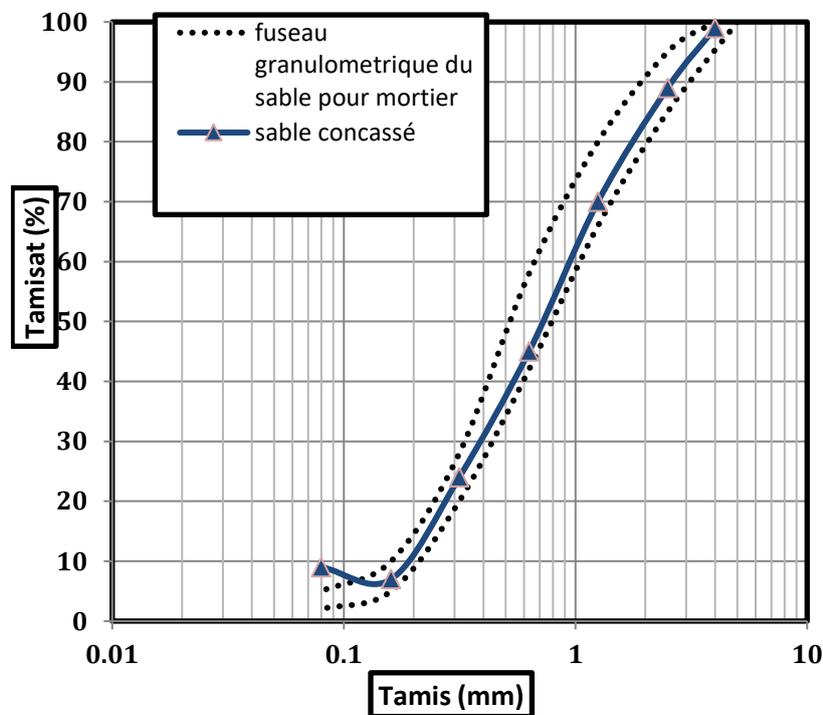


Fig. II-7. Analyse granulométrique du sable concassé.

- **Mesure de l'équivalent de sable selon la norme NF P 18-598.**

L'essai d'équivalent de sable (E.S) est généralement utilisé pour contrôler le sable :

$$E_s = \frac{h_1}{h_2} \times 100$$

Les valeurs préconisées par la norme (**NF P 18-598**) correspondent aux intervalles suivant [36]:

1. $60 \leq ES \leq 70$: Sable légèrement argileux - admissible pour mortiers courants avec risque de retrait important,
 2. $70 < ES \leq 80$: Sable propre - convient bien pour un mortier de haute qualité ;
 3. $ES > 80$: Sable très propre - absence presque totale de fines argileuses.
- Les valeurs obtenues des coefficients d'équivalent de sable visuel et à piston sont respectivement 76 % et 74 %. Le sable concassé (0- mm) utilisé est donc un sable propre et qu'il convient parfaitement pour la formulation d'un bon mortier de haute qualité. Nous rappelons que ces valeurs de l'ES sont des valeurs moyennes de trois mesures effectuées sur trois échantillons du sable utilisé.



Fig. II-8. Essai de l'équivalent de sable [Laboratoire LTPO (Ain-Témouchent)].

- **Mesure de la masse volumique apparente et absolue du sable selon la norme NF P 18-555**

Les mesures des masses volumiques apparente et absolue sont nécessaires, non seulement pour contrôler la qualité des granulats, mais aussi pour calculer la composition des mortiers.

Alors, cet essai permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume du sable pour élaborer la composition de mortiers dont les caractéristiques sont imposées.

Il est important de noter qu'une répétabilité des essais a été effectuée pour la détermination de l'ensemble des caractéristiques physiques du sable utilisé dans cette étude. Les résultats de cette caractérisation sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tab. II-6. Caractéristiques physique du sable concassé (0-4mm).

Caractéristiques (sable 0-4 mm)	Valeurs
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,58
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,50
Equivalent de sable visuel (%)	76
Equivalent de sable à piston (%)	74
Module de finesse	2.66
Teneur en fin (%)	9
Coefficient d'uniformité	4.44
Coefficient de courbure	1.05

II.2.3. La Vase du barrage de SEKKAK

II.2.3.1. Préparation de la vase

La vase prélevée dans les zones de rejet du barrage de SEKKAK est convenablement préparée et subit un traitement lui assurant la réactivité pouzzolanique recherchée pour la substitution envisagée. Le processus de préparation et de traitement thermique de la vase est présenté en détail ci-dessous :

- a- **Séchage** : La vase est tout d'abord séchée dans une étuve à 105° C,
- b- **Concassage** : La vase étuvée est concassée pour faciliter son broyage,
- c- **Broyage** : La vase concassée est broyée à l'aide d'un broyage électrique (à boulets),
- d- **Tamisage** : La vase broyée est tamisée par voie sèche au tamis de 80 µm,
- e- **Calcination** : C'est un traitement thermique effectué à l'aide d'un four à moufle sur la vase déjà broyée et tamisée. La température de cuisson appliquée est de 750° C, et est maintenue constante pendant 3 heures pour obtenir finalement de la vase calcinée. Sa conservation doit être à l'abri de l'air et de l'humidité (voir le produit final sur la **Fig. II-9**).



Fig. II-9. Le produit final de la vase calcinée de Barrage de SEKKAK.

II.2.3.2. Caractéristiques de la vase calcinée

La composition chimique de la vase calcinée à été effectuée au laboratoire L.T.P.O. d'Oran. Les résultats de cette analyse sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tab. II-7. Analyse chimique de la vase calcinée.

Caractéristiques	SiO₂	Fe₂O₃	Al₂O₃	SO₃	CaCO₃
Quantités (%)	70.85	3.23	5.70	13.21	7.01

Il est important de noter qu'un matériau est considéré à caractère pouzzolanique si :

- Sa composition chimique vérifiée : $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70 \%$,
- Son indice d'activité pouzzolanique I est : $0,67 < I < 1$ [37].

Conte tenu des résultats du **Tab. II-7** et d'après les précisions du L.T.P.O que la vase calcinée étudiée contient un pourcentage en chaux libre CaO négligeable, on peut attribuer à la vase calcinée du barrage SEKKAK le caractère d'une pouzzolane artificielle.

Le tableau ci-dessous (**Tab. II-8**) récapitule les différents résultats de la caractérisation physique de la vase calcinée.

Tab. II-8. Caractéristiques physiques de la vase calcinée.

Caractéristiques de la vase	Quantités
Masse volumique apparente lâche (g /cm³)	0.96
Masse volumique absolue (g /cm³)	2.23
Surface spécifique Blaine (cm²/g)	5403.71

II.2.4. Préparation des éprouvettes

Les différents mortiers testés dans ce travail de recherche sont élaborées conformément aux compositions données dans le tableau ci-dessous (**Tab. II-9**). Nous rappelons que le rapport E/C était constant dans toutes les formulations étudiées afin de voir clairement l'influence des différents dosages de la vase du barrage de SEKKAK.

Tab. II-9. *Les différentes compositions des mortiers étudiés.*

Mortiers	E/L	Ciment (g)	Vase (g)	Sable concassé (g)	Eau (g)
MT	0,49	450	0	1350	220.5
5%V	0,49	427,5	22 ,5	1350	220.5
10%V	0,49	405	45	1350	220.5
15%V	0,49	382,5	67,5	1350	220.5
20%V	0,49	360	90	1350	220.5
25%V	0,49	337 ,5	112,5	1350	220.5

La confection de tous les mortiers a été effectuée dans une température ambiante de laboratoire ($T = 20 \pm 2^\circ \text{C}$).

Le mode de préparation des gâchées a été effectué selon la norme **EN 196-1** et a été uniformisé dans ce travail de recherche pour la confection de toutes les séries des mortiers étudiés. En effet, après avoir peser les quantités du sable, de la vase et du ciment, les composants sont introduits dans le malaxeur dans l'ordre suivant [38] :

1. On commence le malaxage (eau +ciment) pendant 30 secondes avec une vitesse lente,
2. Ensuite, et sans l'interruption de malaxage, on ajoute le sable et la vase est introduit régulièrement (automatiquement) pendant les 30 secondes suivantes,
3. Une fois le mélange (le sable et la vase) est introduit, on donne une vitesse rapide au malaxage pendant 30 secondes,
4. Le malaxage est interrompu par la suite pour racler les parois pendant 15 secondes afin d'homogénéiser le mortier,
5. Ce temps d'arrêt de malaxage est au total de 1 minute et 30 secondes,
6. Ensuite, on reprend le malaxage à grande vitesse pendant 60 secondes,
7. Pour la confection de nos mortiers, nous avons utilisé des moules métalliques normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée (4 x 4) cm et d'une longueur de 16 cm,
8. Pour le remplissage de moule (en trois couches), ce moule métallique doit être fixé à la table à choc permettant d'appliquer 60 chocs au moule, en le faisant chuter d'une hauteur constante à chaque fois pendant 60 secondes,
9. Une fois les moules sont bien remplis à l'aide de la table à choc et le mortier est bien arasé, nous les avons recouvert avec de papier filme,

10. La conservation de ces moules a été effectuée à une température d'environ 20° C et le démoulage a été effectué après 24 h de conservation. Une fois les éprouvettes sont démoulées, nous les avons conservés dans de l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ \text{C}$.

II.2.5. Mesures expérimentales

II.2.5.1. Essai sur mortier à l'état frais

- **Mesure de la maniabilité selon les normes NF P18-452**

Il s'agit à partir de cet essai d'une méthode de mesure qui permet d'évaluer la fluidité (l'écoulement) du mortier, ou l'effet de réduction d'eau qu'il permet d'obtenir avec la même consistance dans le but d'une bonne mise en œuvre.

Dans cet essai, la consistance est caractérisée par le temps nécessaire pour l'écoulement du mortier sous vibration [35].

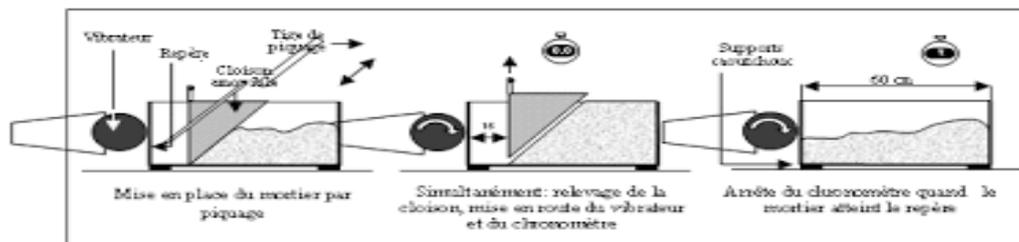


Fig. II-10. Principe de fonctionnement du maniabilimètre.

Le résultat de la mesure est le temps T mis par le mortier pour atteindre le trait repère du maniabilimètre. On en déduit la consistance du mortier comme suit (**Tab. II-10**):

Tab. II-10. Type de mortier selon le temps de maniabilité.

Classe de consistance	Durée en (s)
Ferme	$T \geq 40$
Plastique	$20 < T \leq 30$
Très plastique	$10 < T \leq 20$
Fluide	$T \leq 10$

Pourtant que dans ce travail de recherche, on se limite seulement à tester des mortiers à l'état durci (à différents ages) avec un seul rapport E/L qui égal à 0.49, mais nous avons comme même testé, à l'état frais, trois séries avec les même formulations indiquées dans le **Tab. II-9** mais avec trois rapport E/L différents (0.4, 0.49 et 0.55). Les résultats de maniabilité obtenus pour tous les mortiers avec les trois rapport E/L sont illustrés en histogrammes sur la figure ci-dessous.

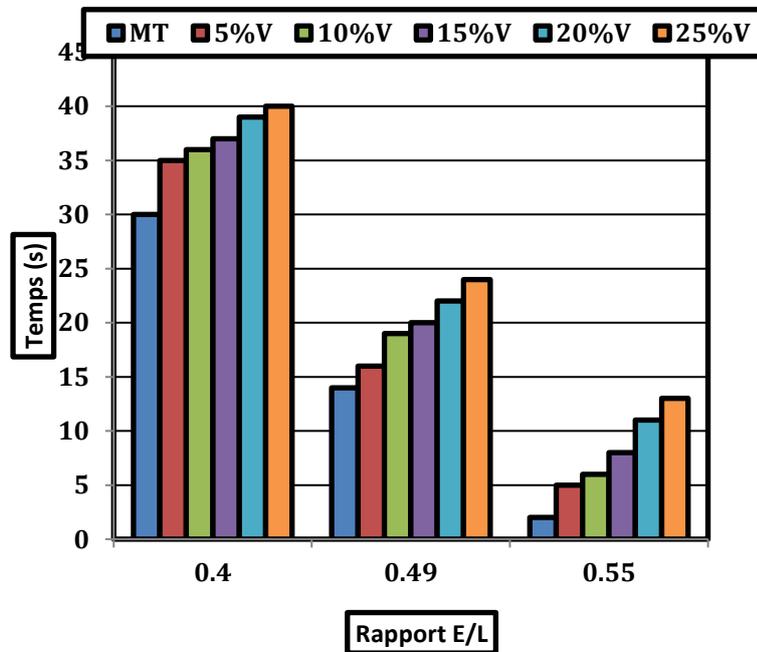


Fig. II-11. Influence de dosage en vase sur l'évolution de la maniabilité dans des mortiers avec différents rapports E/L.

D'après les résultats obtenus représentés dans la **Fig. II-11**, l'ouvrabilité des mortiers avec un rapport E/L de 0,49 est classée plastique.

Outre l'influence du la teneur en eau la maniabilité varie fortement en fonction des différents liants testés, on remarque en effet une légère augmentation de la maniabilité surtout avec le rapport $E/L = 0,49$ qui fait l'objet de notre étude cela prouve que l'augmentation du taux de vase calcinée accroît la demande en eau, la croissance de la demande en eau est principalement a la granulométrie de l'ajout qui est inferieure a $80\mu m$.

D'après la caractérisation du sable concassé utilisé dans la formulation des différents mortiers on constate un taux de fins relativement élevé qui est de 9 %, cependant d'après les résultats de l'essai de la maniabilité on remarque que la maniabilité est plus influencé par le rapport E/C que pas ce taux de fins observé des résultats du mortier témoins.

- **Mesure de l'air occlus selon la norme NF P18-353**

L'aéromètre est utilisé pour mesurer l'air dans le matériau cimentaire à l'état frais (pendant le processus de fabrication). Dans ce travail expérimental, l'aéromètre nous permet de suivre l'influence de la quantité de la vase sur la quantité d'air introduite dans le mortier étudié lors du processus de fabrication.

La **Fig. II-12** présente l'évolution de l'air occlus dans le mortier en fonction de sa teneur en poudre de la vase dans le cas des trois rapports E/L étudiés à l'état frais. Nous rappelons que chaque résultat présenté dans la figure ci-dessous (**Fig. II-12**) correspond à la moyenne arithmétique de trois mesures obtenues par trois essais de l'air occlus effectués pour chaque formulation de mortiers testés.

On remarque que la quantité de l'air occlus dans le mortier est plus faible dans le cas d'un rapport E/L égal à 0,55 par rapport aux autres rapports E/L. Ceci peut être expliqué que beaucoup d'air pourra être piégé dans le matériau quand la quantité de l'eau est plus faible, ce qui pourra conduire à une hydratation incomplète des grains solides dans le mortier frais. Les résultats montrent aussi que plus la quantité de la vase est importante dans le mortier, plus la quantité de l'air occlus dans le matériau augmente cela doit revenir au fait que il ya possiblement dans le squelette granulaire des pores de taille moyennes a petite et peu nombreuse en raison de la finesse de la vase calcinée ajoutée.

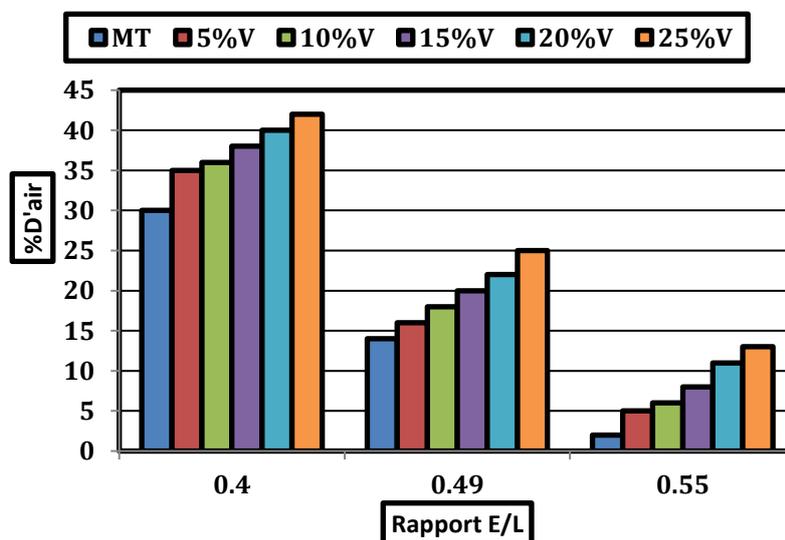


Fig. II-12. Influence de dosage en vase sur la quantité d'air occlus dans des mortiers avec différents rapports E/L.

Les essais de la résistance mécanique (à la flexion ou à la compression) sont souvent effectués sur des éprouvettes prismatiques de $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ qui étaient conservées dans l'eau à 20° C.

II.2.5.2. Essai sur mortier durci

- **Mesure de la résistance mécanique selon la norme NF 18-407**

Les éprouvettes sont testées en traction par flexion puis en compression simple, à 7, 28 et à 60 jours. Les valeurs prises sont la moyenne de trois mesures pour les différents mortiers étudiés.

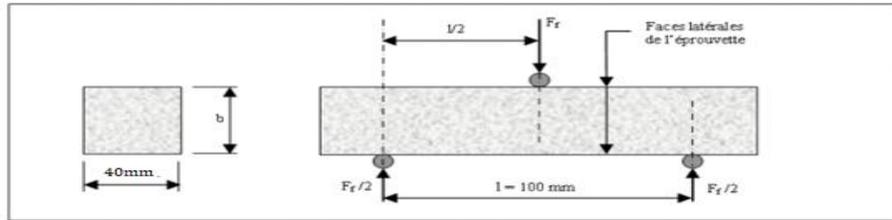


Fig. II-13. Principe de l'essai de traction par flexion pour mortier.

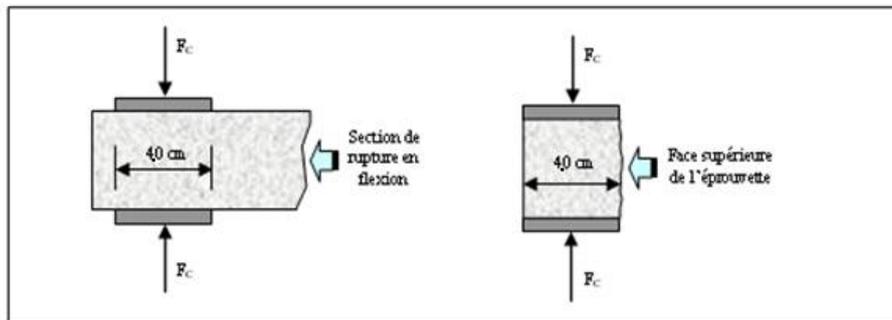


Fig. II-14. Principe de l'essai de compression simple pour mortier.

Les résultats des essais mécaniques à la flexion et à la compression sont présentés et discutés dans le chapitre suivant (Chapitre III).

- **Mesure de l'absorption capillaire du mortier selon la norme NF P 18-555**

Dans de but de suivre l'évolution de quantité d'eau absorbée par les mortiers étudiés, cet essai est complémentaire dans notre étude qui inspire à la valorisation de la vase calcinée en tant que substituant d'une quantité de ciment dans des mortiers ordinaires.

Le principe de cet essai est de quantifier l'absorption des mortiers avec différents rapport E/L et avec différents dosages en vase calcinée au cours du temps. Alors, cet essai a été effectué sur des échantillons prismatiques ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 à l'âge de 28 et 60 jours.

À la fin de cette période de cure, les éprouvettes sont séchées à étuve à 105°C et pesée chaque 24h jusqu'à stabilisation de la masse puis laisser à l'air libre de laboratoire pour le refroidissement totale. Cinq face le l'éprouvette ont était recouvertes avec deux couches de la résine époxy, et seulement une face de $(4 \times 4) \text{cm}^2$ est non recouverte et qui sera finalement en contacte directe avec de l'eau distillée, tel qu'il est indiqué sur la Fig. II-15.

Une fois les éprouvettes sont prêtes (recouvertes avec de la résine), elles sont pesées: soit M_0 puis posées verticalement sur un bac en verre rempli d'eau dont la surface non recouverte des échantillons sont immergées dans l'eau sur une hauteur de 5 mm. Aux échéances données et après avoir épongé chaque échantillon, l'évolution de la masse est suivie par pesée (M_i) après 5, 10, 15, 30 et 60 min de l'immersion dans de l'eau (**Fig. II-15**).



Fig. II-15. Essai de l'absorption capillaire.

- **Mesure de la porosité accessible à l'eau du mortier**

L'essai de la porosité ouverte (accessible à l'eau) consiste à la détermination par peser des masses suivantes:

- La masse de l'échantillon du mortier dans l'air libre, alors qu'il est complètement saturé avec de l'eau distillée (la saturation du matériau est appliquée sous vide dans un dessiccateur à l'aide d'une pompe à vide),
- La masse de l'échantillon saturé et immergé dans l'eau mesurée à l'aide d'une balance hydrostatique (alors qu'il est encore imbibé de liquide après la saturation),
- La masse sèche de l'échantillon du mortier (à l'état complètement sec) mesurée après un séchage à l'aide d'une étuve jusqu'à stabilisation de la masse après plusieurs jours.

Dans cette étude, les mesures de la porosité ouverte ont été prises sur des échantillons du mortier à l'âge de 60 jours. Trois échantillons de chaque formulation étudiée ont été testés pour chaque essai de porosité. Pour ce faire, selon la norme AFREM-AFPC, les échantillons sont placés dans un dessiccateur vide (récipient étanche) sous une dépression d'air constante de 25 mbars appliquée pendant 24H à l'aide d'une pompe à vide (pendant le premier jour). Sans éteindre la pompe, une immersion à mi-hauteur des échantillons placés dans le dessiccateur est appliquée pendant les 24H suivante (pendant le deuxième jour) selon la norme AFREM-AFPC. Les trois

échantillons sont immergés complètement avec deux centimètres de hauteur de l'eau au dessus des échantillons pendant les 24H suivante (durant le troisième jour).

Les éprouvettes sont alors sorties du récipient et pesé dans l'eau à l'aide d'une balance hydrostatique. On détermine ainsi la masse $M_{Sat.immer.}$ puis sortie de l'eau et essuyées rapidement à l'aide d'une éponge humide. La masse $M_{Sat.}$ est obtenue par pesée dans l'air à 0,01 près.

Pour déterminer la masse sèche, les échantillons du mortier ont été placés dans une étuve régulée à $65 \pm 2^\circ \text{C}$ jusqu'à ce que deux pesés successives, avant et après une présence de 24h à l'étuve, ne diffèrent pas de plus de 0,05 %. La masse ainsi déterminée est $M_{sec.}$

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

$$\varepsilon = \frac{M_{Sat.} - M_{sec}}{M_{Sat.} - M_{Sat.immer.}} \times 100$$



Fig. II-16. Essai de la porosité accessible a l'eau.

- **Mesure de la vitesse de propagation des ondes soniques (Essai Essai Ultrasonique) selon la norme NF EN 12504-4**

L'essai Ultrasonique est un essai non destructif très important qui nous permet de déterminer la vitesse de la propagation des ondes ultrasonique à travers le matériau, et par conséquent, de déduire à la fois plusieurs caractéristiques, tels que : le degré de compacité, la résistance à la compression, le taux de fissuration, ...etc.

Alors, l'essai réalisé consiste à mesurer la vitesse du son à l'intérieur des mortiers étudiés; cette vitesse est d'autant plus élevée que le mortier à un module d'élasticité plus important, donc à priori une résistance plus importante.

Cette méthode de transmission directe du son à travers le matériau, consiste à presser les deux têtes de mesure sur deux faces parallèles de l'éprouvette, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transmission du son. La surface du mortier doit être raisonnablement plane et bien nettoyée. Dans cette étude, et puisque la taille des éprouvettes testées n'est pas de grandes dimensions, il est préférable de mesurer la vitesse du son dans le sens longitudinal de l'éprouvette (à travers les 16 centimètres de la longueur de l'éprouvette) au-lieu de mesurer la vitesse du son à travers sa largeur qui est seulement de 4 cm. cette dernière qui pourra nous donner des résultats moins significatifs que ceux obtenus dans le sens longitudinal (de 16 cm) (voir la **Fig. II-17**). Il est important de noter qu'une fois l'appareil mis en marche, on peut lire directement le temps de propagation en microseconde.



Fig. II-8. Essai ultrasonique.

Les résultats obtenus de l'absorption capillaire, de la porosité ouverte et de la propagation ultrasonique à travers les mortiers étudiés sont présentés et discutés dans le chapitre suivant (Chapitre III).

II.3. Conclusion

D'après les résultats obtenus dont certains sont présentés dans ce deuxième chapitre notamment à l'état frais, la substitution d'une quantité de ciment par la vase de barrage de SEKKAK, peut donner des résultats suffisamment fiable, principalement pour une meilleurs mise en ouvre (à l'état frais) ce qui nous laisse penser qu'il est très possible de l'utiliser dans des mortiers ordinaires afin de minimiser la quantité de ciment qui peut être consommée dans des mortiers classiques (sans ajouts).

Il est important de noter qu'un nombre très important des éprouvettes ont été préparées pour notre campagne expérimentale afin de réaliser beaucoup d'essai à l'état durci effectués à trois différents âges du matériau et notamment pour garantir une répétabilité des tests effectués (des mesures effectuées sur trois éprouvettes du mortier pour chaque essai).

Dans ce qui suit (le chapitre III), une valorisation de la vase (de barrage de SEKKAK) dans les mortiers à l'état durci sera discutée en détail.

CHAPITRE III:

Analyse et interprétation des résultats.

III.1. Introduction

Après avoir vu dans le chapitre précédent les caractéristiques principales des matériaux utilisés pour la préparation des mortiers étudiés, ainsi que les méthodes suivies pour effectuer certains essais au laboratoire, ce troisième chapitre est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus dans notre campagne expérimentale effectuée, dont l'objectif principal est de valoriser la vase issue de barrage de SEKKAK pour une utilisation comme ajout au liant dans un matériau cimentaire (un mortier ordinaire). Alors, l'influence de cette vase (traitée) sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers étudiés est discutée dans ce qui suit dans ce chapitre.

III.2. Influence de la vase du Barrage de SEKKAK sur les propriétés mécaniques des mortiers étudiés

III.2.1. La résistance à la traction par flexion

Nous rappelons que les résistances mécaniques à la traction par flexion ont été mesurées par l'essai de flexion simple (flexion par traction). Chaque valeur indiquée sur les figures ci-dessous est la valeur moyenne de trois mesures effectuées sur trois éprouvettes du mortier. La **Fig. III-1** montre l'évolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de différents âge du mortier (7, 28 et 60 jours).

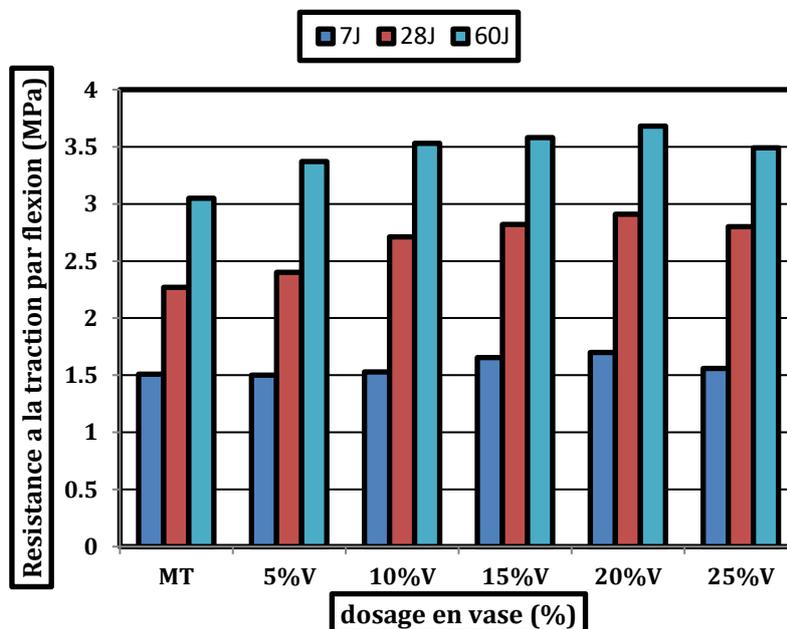


Fig.III-1. Influence de la Vase du Barrage de SEKKAK sur l'évolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers étudiés.

Les premiers résultats obtenus illustrés dans la **Fig. III-1**, indiquent que la résistance à la traction du mortier augmente avec son âge (en fonction du temps). En effet, au jeune âge (à 7 jours), on ne peut remarquer clairement la différence entre les résistances mécaniques à la traction des différents mortiers. Ce n'est qu'au-delà de 28 jours et notamment à 60 jours que cette variation dans les résistances obtenues est remarquable et peut être significative. Le mortier témoin ainsi que mortier avec 5 % de la vase donne les valeurs les plus faibles de la résistance à la traction pour les différents âges. Une augmentation en résistance est clairement remarquable en fonction de dosage en Vase utilisée et jusqu'à une valeur de 20 %. Néanmoins, quand ce pourcentage de la vase dans le liant est de 25 %, une diminution est remarquée dans la résistance à la traction du matériau. Cela est plus remarquable notamment à l'âge de 60 jours. On note un écart entre les résistances obtenues à l'âge de 28 et de 60 jours plus importants dans le cas des mortiers à base de la vase par rapport celles obtenues dans le cas du mortier témoin. Cela est due certainement l'effet pouzzolanique de la vase qui influe sur la résistance mécanique à long terme. Tandis que pour la résistance au jeune âge des mortiers contenant de la vase calcinée reste tout aussi comparable à celle du mortier témoin.

II.2.2. La résistance à la compression simple

La résistance à la compression est une donnée importante pour la conception d'un matériau cimentaire. Les autres propriétés mécaniques, comme la résistance à la traction et à l'effort tranchant, le module d'Young, la relation contrainte déformation, sont reliées diversement à la résistance en compression [39]. Dans ce travail de recherche, les résultats de la résistance à la compression sont également employés pour qualifier et quantifier l'efficacité de l'addition minérale étudié qui est la vase issue de barrage de SEKKAK dans le but de remplacer une quantité du ciment utilisé dans un mortier ordinaire.

Dans cette partie, les essais de la résistance à la compression sont effectués sur les six échantillons du mortier obtenus suite à l'essai de la flexion de trois éprouvettes ($4 \times 4 \times 16$) cm³ de chaque mortier testé.

Pour suivre l'évolution des résistances au cours du temps et faciliter l'analyse des résultats trouvés, l'approche graphique à l'aide des histogrammes a été choisie (**Fig. III-2**). Les résultats illustrés sur la figure ci-dessous correspondent aux résistances obtenus à des différents âges et pour différents dosages de la vase traité.

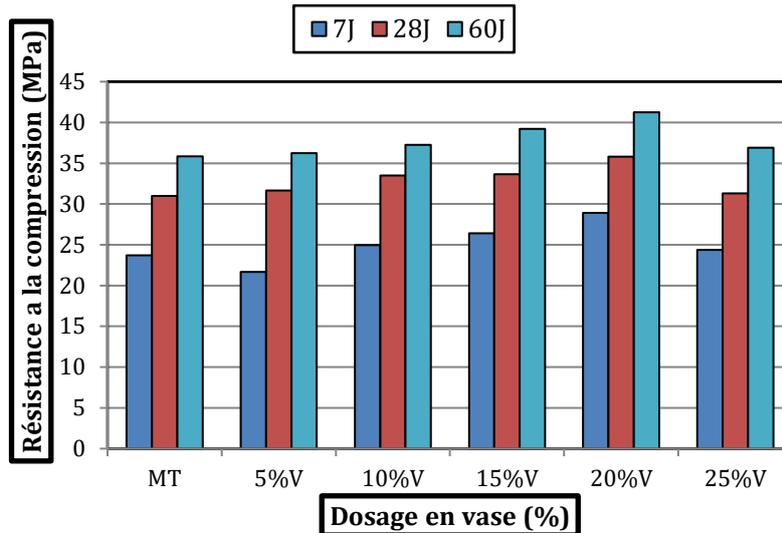


Fig.III-2. Influence de la Vase du Barrage de SEKKAK sur l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers étudiés.

Les résultats montrent que la vase traitée, issue de barrage de SEKKAK, influe sur la résistance mécanique à la compression des mortiers étudiés. Ceci est principalement remarqué à l'âge de 60 jours (à long terme) tel qu'il est indiqué dans la partie correspondant à la résistance à la traction du mortier. Cette cinétique de développement des résistances s'explique par l'activité de la vase et par le fait que l'action pouzzolanique ne devient sensible qu'à partir des âges plus avancés pour se déclencher et fixer la chaux libérée par le ciment au cours de son hydratation pour former de nouveaux silicates de calcium hydratés qui participent à l'augmentation de la résistance.

L'indice d'activité noté i a été calculé en faisant le rapport entre les résistances à la compression à 28 jours mesurée sur un mortier sans vase (MT) et celle du mortier contenant par exemple 25 % de vase en substitution (25%V) par le biais de la formule suivante :

$$i = R_{c_{28}25\%V} / R_{c_{28}MT}$$

La norme indique qu'une addition réactive possède un indice d'activité compris entre 0,67 et 1 [40], ce qui est le cas de la vase calcinée puisque son indice d'activité est de 0,98 ; donc la pouzzolane artificielle (à base de la vase calcinée du barrage SEKKAK) peut être considérée comme matériaux pouzzolaniques puisqu'elle vérifie la condition.

Il est important de noter aussi que plus le dosage en vase est élevé, et jusqu'à une valeur de 20 %, plus la résistance à la compression est importante. La substitution avec 20 % de la vase étudiée permet donc d'obtenir les meilleures valeurs de résistance à la compression, similairement au cas de la traction. Par contre, la résistance diminue dans le cas d'un dosage en vase de 25 %. L'augmentation en résistance est certainement due à l'augmentation de la finesse

du liant modifié avec un pourcentage de la vase du Barrage de SEKKAK. Cette dernière qui a une finesse de mouture ou autrement dit "une surface spécifique Blaine" largement plus élevée que celle du ciment. C'est la raison pour laquelle le mortier devient plus compacte et certainement avec porosité plus faible, ce qui conduit à une résistance élevée.

Par ailleurs, un fort dosage en vase pourra conduire aussi à moins de liaison chimique entre les hydrates du matériau cimentaire et par conséquent à une diminution en résistance. La composition chimique de la vase reste plus pauvre par rapport à celle du ciment (ou de Clinker) pour former certaines hydrates et minéraux dans le matériau cimentaire comme l'ettringite et la portlandite qui jouent un rôle principale dans l'évolution de la résistance.

III.2.3. Le module d'élasticité (E_c)

Le module d'élasticité E_c est calculé pour les mortiers étudiés selon les règles BAEL91 par formule suivante :

$$E_c = 3700 \sqrt[3]{R_c}$$

Avec R_c : la résistance en compression du matériau.

À partir des résultats obtenus, présentés dans la **Fig. III-3**, le module d'élasticité E_c des mortiers suit la même tendance que la résistance à la compression.

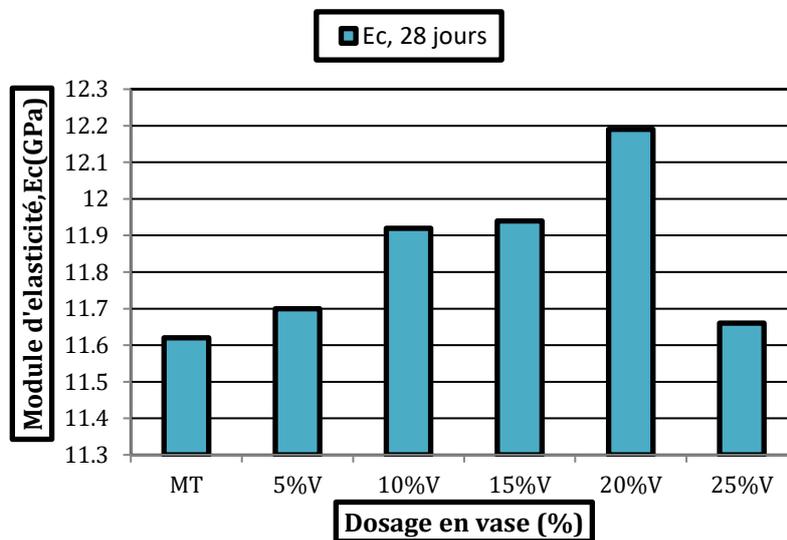


Fig.III-3. Influence de la Vase du Barrage de SEKKAK sur l'évolution du Module élastique des différents mortiers étudiés à l'âge de 28 jours.

Il est observé que le module d'élasticité E_c atteint une valeur maximale dans le cas du mortier contenant 20 % de la vase. Le module élastique du mortier témoin à l'âge de 28 jours donne une

valeur plus faible de ce module mais similaire à celle obtenue dans le cas des mortiers contenant 5 et 25 % de la vase utilisée.

On peut également noter que la valeur du module d'élasticité dynamique (E_c (en GPa)) peut être corrélée avec la résistance à la compression du matériau (R_c (en MPa)). Une relation mathématique peut donc être donnée entre ces deux paramètres comme il est illustré sur la **Fig. III-4**.

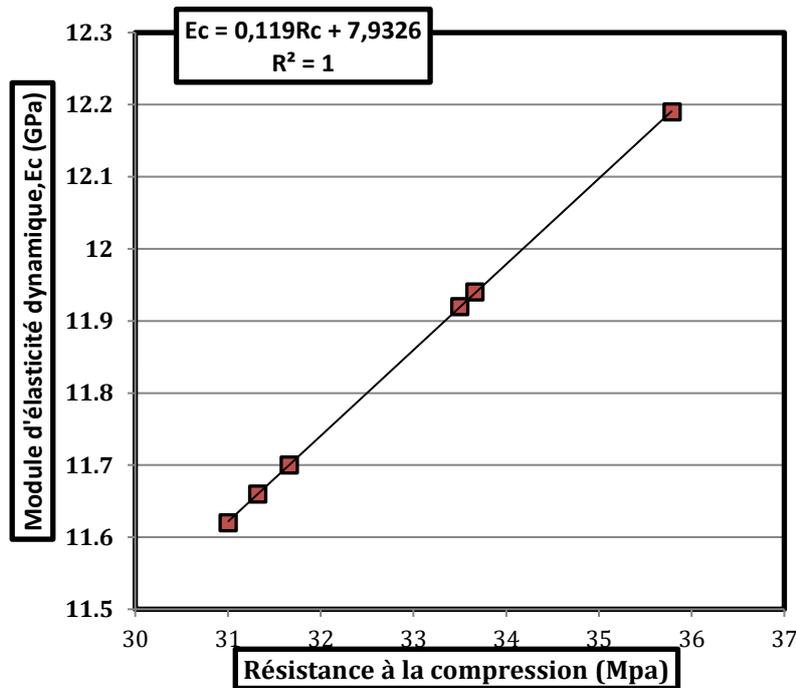


Fig.III-4. Evolution du Module élastique des mortiers étudiés en fonction de leurs résistances à la compression à l'âge de 28 jours.

L'augmentation de la résistance à la compression R_c induit une élévation du module d'élasticité dynamique E_c , cette variation peut être définie par l'équation suivante :

$$E_c = 0,11R_c + 7,93$$

Cette équation est obtenue avec un coefficient de régression R^2 de 1

L'ajout de la vase calcinée semble donc augmenter la rigidité du matériau. Cela est en accord avec les observations faites dans les **Figs. III-1** et **III-2**, qui présentent l'évolution de la résistance mécanique du matériau en fonction de son âge.

III.2.4. Calcul des paramètres mécaniques à partir de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (UVP)

III.2.4.1. Résultats de l'essai Ultrasonique

Dans le but de la détermination des caractéristiques mécaniques des mortiers étudiés, la vitesse du son dans les sens longitudinal et transversal de chaque éprouvette des mortiers testés, a été mesurée à l'âge de 28 jours de manière non destructive. Les mesures ultrasoniques peuvent être interprétées selon les critères décrits dans le tableau ci-dessous.

Tab. III-1. Corrélation entre la vitesse du son et la qualité du mortier [41]

Vitesse du son (m/s)	Qualité du mortier
> 3500	Bonne
3000 à 3500	Assez bonne
< 3000	Médiocre

Les résultats des essais ultrasoniques, effectués dans le sens longitudinal et transversal de l'éprouvette du mortier à l'âge de 28 jours, sont donnés respectivement par les **Figs. III-5** et **III-6**.

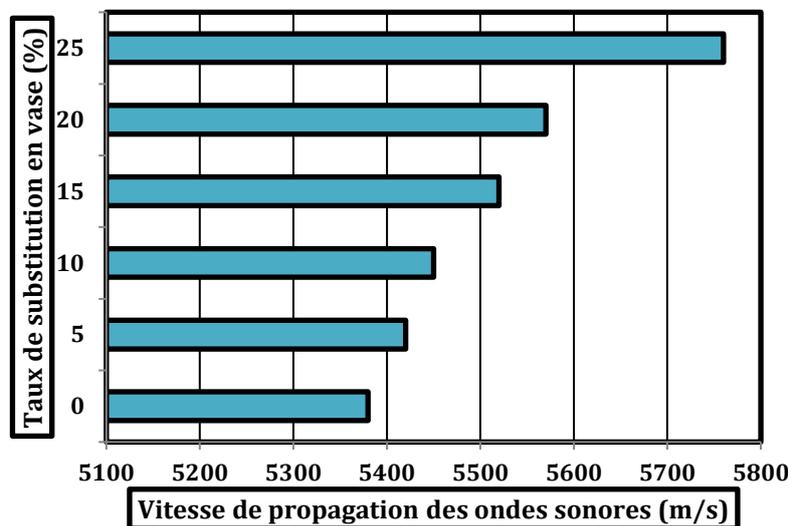


Fig. III-5. Influence de la vase sur la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le sens longitudinal de l'éprouvette du mortier à l'âge de 28 jours.

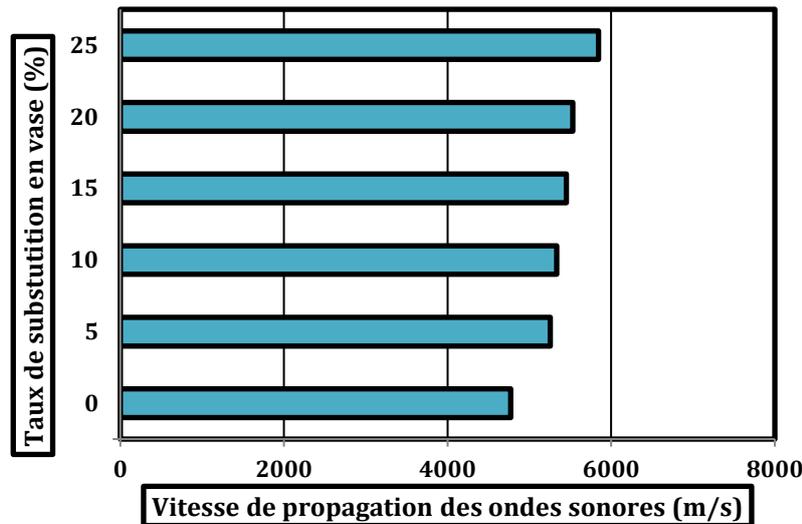


Fig.III-6. Influence de la vase sur la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le sens transversal de l'éprouvette du mortier à l'âge de 28 jours.

D'après le **Tab. III-1**, les mortiers selon les résultats de la vitesse de la propagation des ondes ultrasoniques sont de bonne qualité. Les résultats obtenus montrent que la vitesse de propagation est plus élevée quand le dosage en vase traitée est plus important dans le mortier. Cela est remarquable à partir des résultats de mesures effectuées dans les deux sens (longitudinal et transversal). Néanmoins, les résultats dans le sens longitudinal peuvent être plus significatifs que ceux obtenus dans le sens transversal. Car une dimension de 4 cm de large peut être considérée comme non suffisante pour une bonne représentativité du matériau étudié. Le mortier contenant un dosage de 25 % de la vase donne une valeur maximale de cette vitesse dans le sens longitudinal (de 16 cm de longueur) qui égale 5760 m/s tandis qu'un mortier témoin (sans la vase) donne une valeur minimale de 5380 m/s.

Il est possible d'attribuer ce retard de propagation des ondes ultrasonores à la contribution de la porosité de la matrice cimentaire qui augmente quand le dosage en vase diminue. En effet, le mortier avec à 25 % de la vase a une porosité ouverte la plus faible à cause de la grande finesse de la vase qui peut modifier la structure poreuse du matériau et rendre le mortier plus compacte (voir les résultats de porosité plus bas).

III.2.4.2. Les résistances mécanique à la compression en fonction de la propagation des ondes ultrasonores longitudinales

Dans le but de calculer d'autres résistances à la compression à partir de la vitesse du son mesurée pour d'autres âges du matériau et pour d'autre dosage en vase, la figure ci-dessous

présentent la résistance a la compression à 28jours en fonction de la vitesse de son mesuré dans le sens longitudinal pour tous les mortiers étudiés.

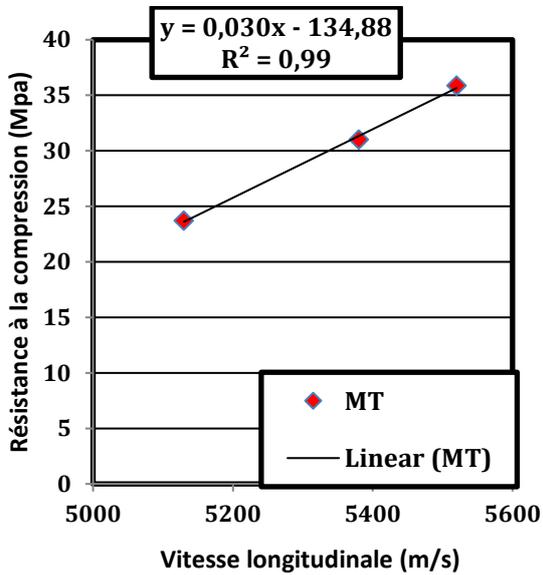


Fig.III-7.Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son longitudinal du mortier témoin.

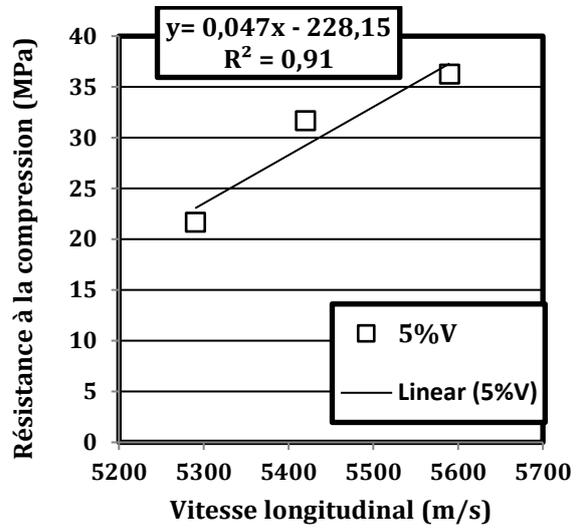


Fig .III-8.Corrélation entre la résistance à la compression el la vitesse du son longitudinal du mortier à 5% de vase substitué.

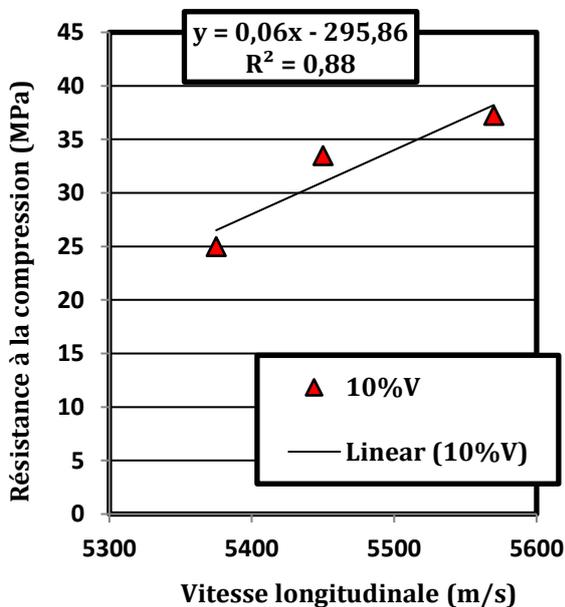


Fig.III-9. Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son longitudinal du mortier à 10% de vase substitué.

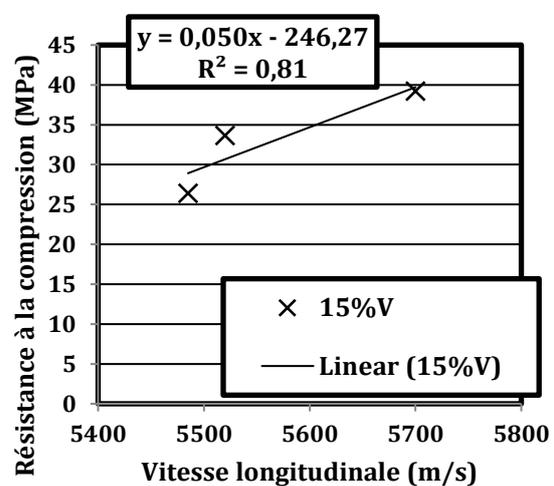


Fig.III-10. Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son longitudinal du mortier à 15% de vase substitué.

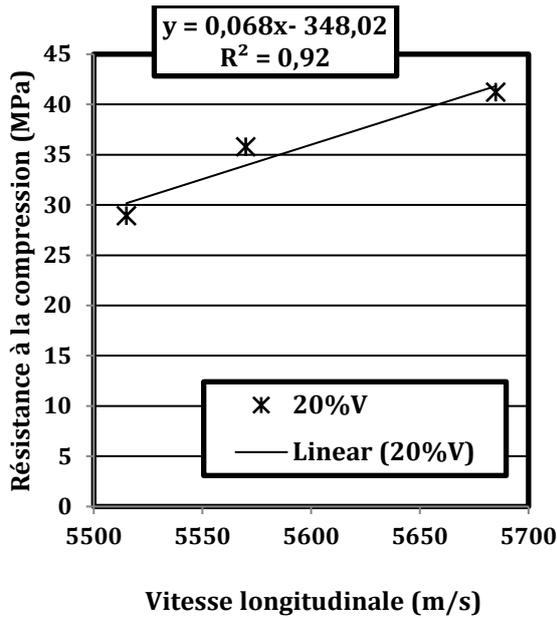


Fig.III-11. Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son longitudinal du mortier à 20% de vase substitué.

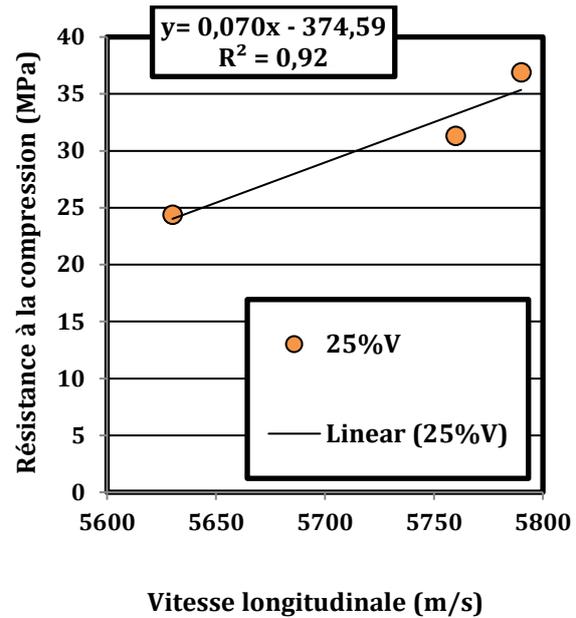


Fig.III-12. Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son longitudinal du mortier à 25% de vase substitué.

De la **Fig. III-7** à la **Fig. III-12** on remarque que la tendance de la vitesse du son est comparable à celle de la résistance à la compression, la vitesse ultrasonique augmente en augmentant la résistance mécanique en compression.

Cette fonction linéaire peut être considérée avec un coefficient R^2 supérieur à 0,9 dans la plupart des cas, indiquant que les mesures des ondes ultrasonores peuvent fournir des moyens efficaces pour déterminer les propriétés mécaniques des mortiers étudiés.

III.2.4.3. Comparaison entre les résistances mécaniques à la compression mesurées et les résistances calculées

Les figures ci-dessous présentent l'évolution des résistances à la compression mesurées au laboratoire, à l'aide d'une presse hydrostatique, en fonction des résistances calculées à partir des vitesses des ondes ultrasoniques propagées à travers des éprouvettes du mortier du même âge (28 jours).

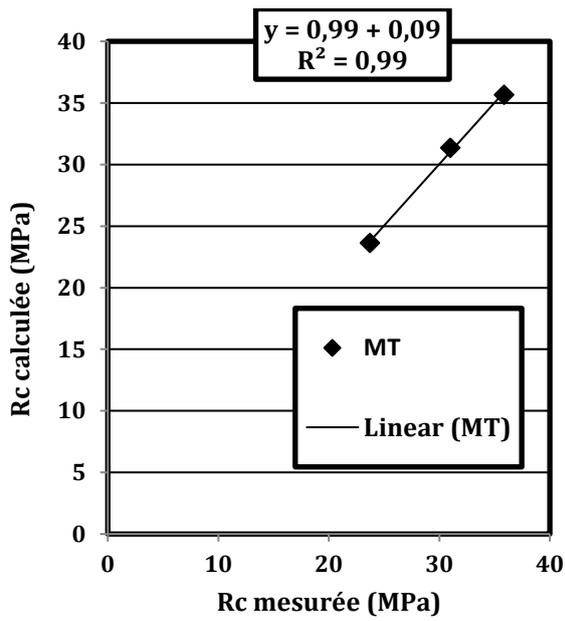


Fig.III-13. Comparaison entre la résistance calculée et mesurée du mortier témoin.

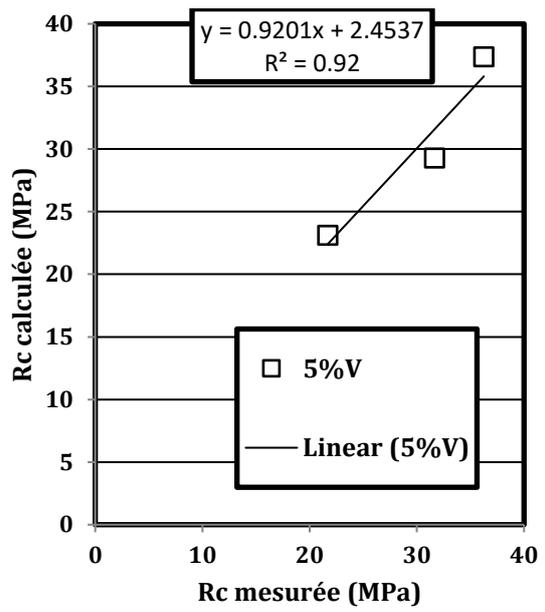


Fig.III-14. Comparaison entre la résistance calculée et mesurée du mortier à 5%de vase ajoutée.

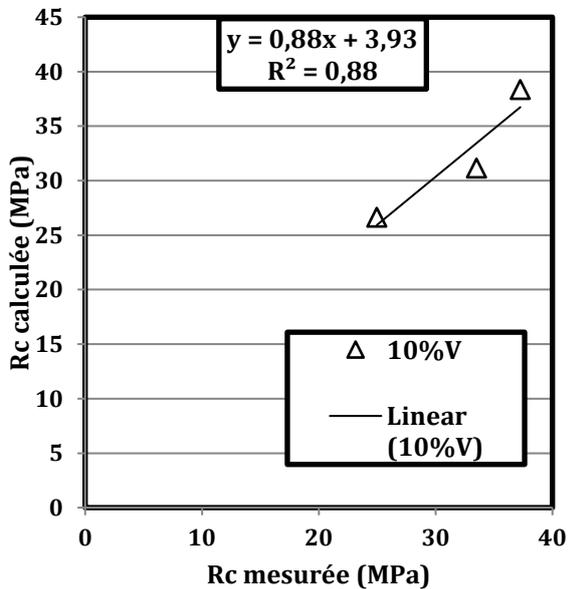


Fig.III-15. Comparaison entre la résistance calculée et mesurée du mortier à 10%de vase ajoutée.

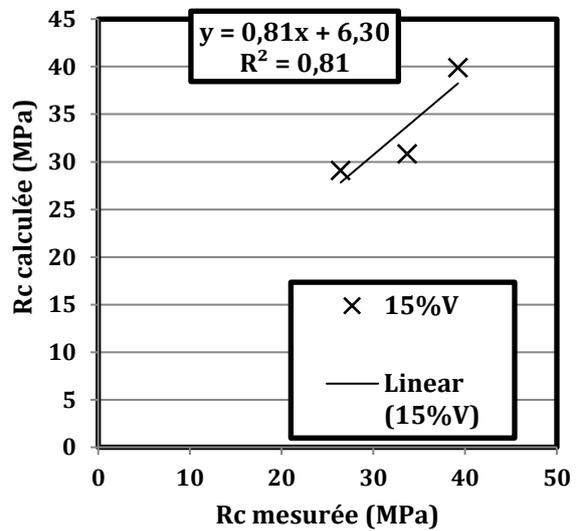


Fig.III-16. Comparaison entre la résistance calculée et mesurée du mortier à 15%de vase ajoutée.

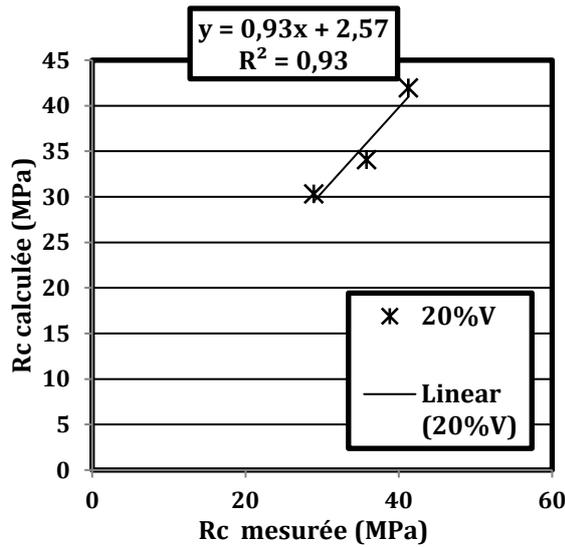


Fig.III-17. comparaison entre les résistances calculée et mesurée du mortier à 20% de vase ajoutée.

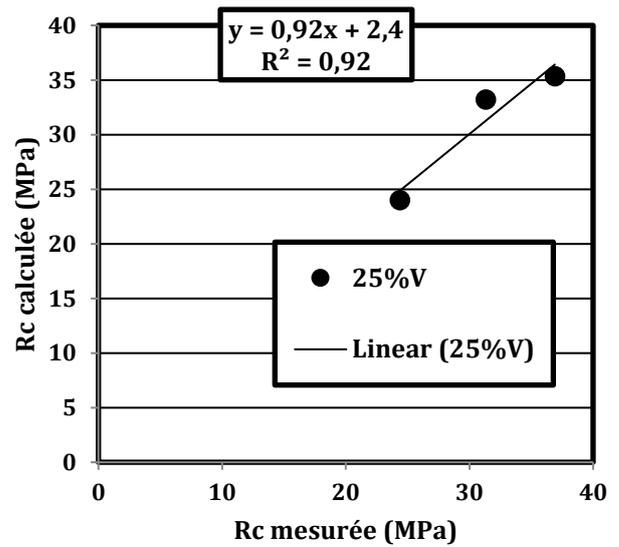


Fig.III-18. Comparaison entre les résistances calculée et mesurée du mortier à 25% de vase ajoutée.

Les résultats obtenus montrent que l'évolution de la résistance à la compression calculée en fonction de celle mesurée peut être estimée correctement par une équation linéaire dont la pente de la droite obtenue pour chaque mortier (illustrés dans la **Fig. III-13** à La **Fig. III-18**) indique une légère sous-évaluation de la résistance mécanique mesurée par rapport à celle calculée. Une équation peut être donnée permettant de déterminer la résistance calculée à partir de la résistance mesurée de la forme $y = a \cdot x + b$.

Les droites obtenues sont généralement avec un coefficient de régression supérieur de 0,9 confirmant une bonne linéarité des résultats obtenus, on peut donc en déduire que les résistances calculées à partir de la vitesse de propagation du son est presque égale aux résistances mesurées par l'essai destructif. Ce qui fait de l'ultrason un dispositif fiable pour la détermination de la résistance à la compression d'un mortier.

III.3. Influence de la vase du Barrage de SEKKAK sur les propriétés physiques des mortiers étudiés

III.3.1. La Sorptivité capillaire

Si les phénomènes d'absorption capillaire sont largement étudiés dans les matériaux cimentaires, les études témoignent généralement que la capacité du mortier à absorber l'eau ne peut être qu'à travers la définition de la sorptivité, qui traduit l'échange à l'interface eau-béton sans rendre compte de la profondeur de pénétration de l'eau. L'absorption capillaire suit une loi en fonction de la racine carrée du temps [42] :

$$\frac{Q}{A} = S. \sqrt{t}$$

La figure ci-dessous (**Fig. III-19**) présente l'évolution de la masse d'eau absorbée par les différents mortiers testés, avec différents dosages en vase calcinée, en fonction de la racine carrée du temps. Nous rappelons que les mesures de l'eau absorbée ont été enregistrées à l'aide des pesées effectuées à 5, 10, 15, 30 et 60 minutes après la mise de l'échantillon du mortier en contact avec de l'eau distillée (tel qu'il est illustré dans le deuxième chapitre).

Notons que les valeurs illustrées sur la figure ci-dessous, sont des moyennes arithmétiques de trois valeurs, obtenues suite à des mesures effectuées sur trois éprouvettes de $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ de chaque mortier étudié à l'âge de 60 jours.

En premier lieu, il est remarquable à partir de la **Fig. III-19** que la quantité de l'eau absorbée par les différents mortiers testés diminue quand le pourcentage de la vase dans le liant augmente. Cela est due principalement au fait que la granulométrie de la vase traitée (calcinée) est très fine. Ce qui peut modifier la structure poreuse du matériau et influencer donc sur l'absorption capillaire du mortier. On constate alors, que le taux d'absorption du mortier témoin (sans la vase) est nettement supérieur à ceux des autres mortiers avec différents pourcentages de la vase calcinée. La finesse de la vase du barrage de SEKKAK qui est bien plus élevée que celle du ciment utilisé dans cette étude nous laisse penser que la substitution judicieuse du ciment par cette vase calcinée peut aller jusqu'à 20 % puisque jusqu'à présent le mortier avec 20 % de la vase donne des résistances mécaniques et des coefficients d'absorption acceptables et suffisantes pour un bon mortier.

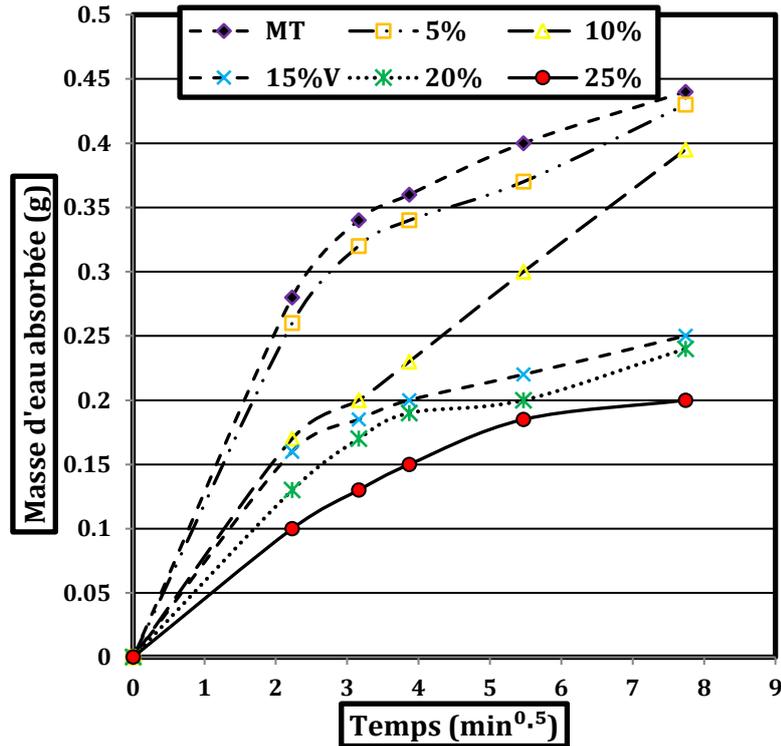


Fig. III-19 Évolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps (Cas des différents mortiers étudiés à l'âge de 60 jours)

➤ **Le coefficient d'absorption capillaire**

La sorptivité capillaire a été mesurée sur les six mortiers étudiés après un séchage du matériau. La Fig. III-20 illustre l'évolution du coefficient d'absorption (ou de sorptivité) en fonction de la racine carrée du temps (à 60 minutes).

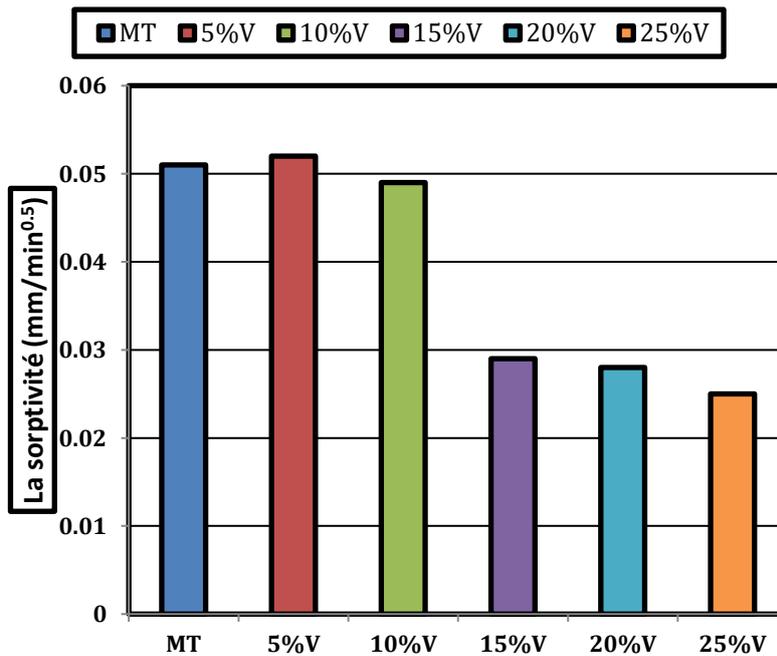


Fig. III-20. La sorptivité capillaire des mortiers étudiés

Le mortier témoin ainsi que les mortiers à 5 et 10 % de vase calcinée ajoutée avec des valeurs de 0.051, 0.052 et 0.49 respectivement, représentent les coefficients d'absorption plus élevées comparés au coefficient des mortiers a dosages en vase de 15, 20 et 25% avec des valeurs relativement plus faible de 0.029, 0.028 et 0.025 respectivement qui diminue avec la diminution de la vase substituée, cela s'explique par le fait que plus le réseau poreux est fin plus le coefficient d'absorption est faible. Les pores du mortier sont donc remplie par la vase calcinée et le nombre de vides qui aurait était occupé par l'eau diminuent.

III.3.2. La porosité accessible à l'eau

La porosité retranscrit le rapport du volume des vides (pores) par rapport au volume total du matériau (pores et solides). Cette caractéristique, en plus de contrôler la résistance en compression des matériaux cimentaires, va influencer beaucoup d'autres propriétés telles que la durabilité du mortier [43].

Les résultats obtenus à l'âge de 60 jours, indiquant l'influence de la vase étudiée (du barrage de SEKKAK) sur la porosité ouverte du mortier, sont illustrés dans la **Fig. III-21** pour les cinq formulations étudiées.

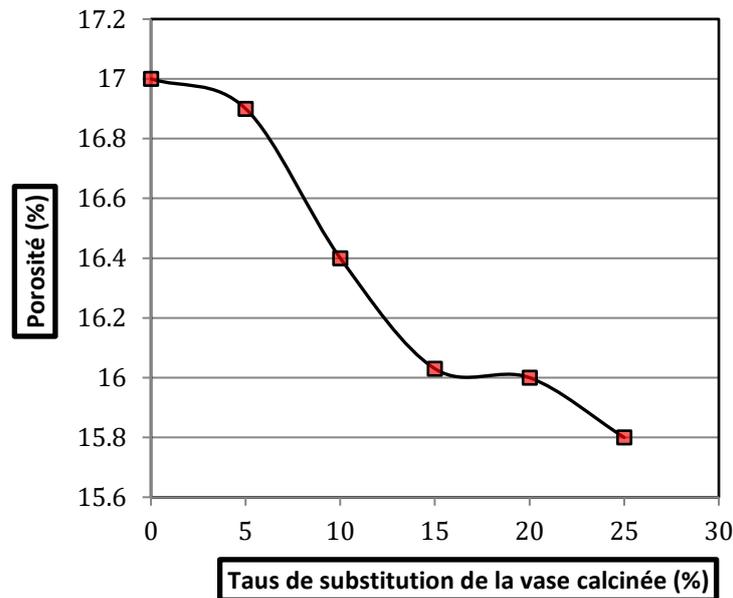


Fig. III-21. Influence de la vase du barrage de SEKKAK sur la porosité des mortiers étudiés

La **Fig. III-21** montre que la porosité ouverte (accessible à l'eau) du mortier diminue avec l'augmentation en dosage de la vase calcinée étudiée. La porosité du matériau témoin égale à 17 % pendant que la porosité du mortier avec 25 % de la vase égale à 15 %. Cette vase, issue de barrage de SEKKAK, à cause de sa finesse très élevée modifie la structure poreuse du mortier et empêche certains passages de l'eau et de l'air pendant l'essai de la porosité, ce qui conduit à des valeurs faibles de porosité finalement. Le matériau devient alors plus compacte et par

conséquent avec résistance mécanique qui peut être plus élevée à cause de cette faible porosité accessible à l'eau. Ces résultats sont en accord avec les résultats d'absorption capillaire indiqués dans la **Fig. III-19**

Il est important de noter aussi que la zone de transition entre un grain du sable et la pâte qui l'entour représente la zone la plus poreuse (un maillon faible) dans la structure d'un mortier. La vase étudiée avec sa faible surface spécifique Blaine conduit donc à une modification de cette zone en premier lieu, tout en réduisant la porosité du matériau.

La vase du barrage de SEKKAK peut alors être un matériau très important à l'aide duquel il est possible de substituer une quantité du ciment dans des mortiers ordinaires puisqu'elle conduit à une diminution en porosité accessible à l'eau qui est un indicateur de durabilité. On peut dire donc que l'introduction de la vase dans des mortiers ordinaires (par substitution) permet non seulement d'augmenter la résistance mécanique du mortier mais aussi d'améliorer la durabilité des structures avec ce nouveau matériau.

III.4. Relation entre la porosité et l'absorption capillaire du mortier

La **Fig. III-22** traduit l'évolution croissante de la sorptivité avec la porosité des mortiers étudiés. L'ensemble de ces résultats met en avant l'importance de la microstructure des bétons, et en particulier de la structure porale, en effet, les mortiers poreux représente en quelque sorte des cas extrêmes devant respectivement avoir une porosité capillaire importante et grossière due à de forts excès d'eau et à l'inverse une porosité très faible et très fine (voire une porosité capillaire quasi-inexistante). Les bétons ordinaires, quant à eux, doivent bénéficier d'une morphologie de la structure poreuse plus graduée qui favorise les écoulements induits par capillarité.[42]

On remarque des résultats que la sorptivité accroit lorsque la porosité augmente, Ces résultats confirment notre constatation précédente comme quoi le volume poreux des échantillons influe essentiellement sur le coefficient d'absorption.

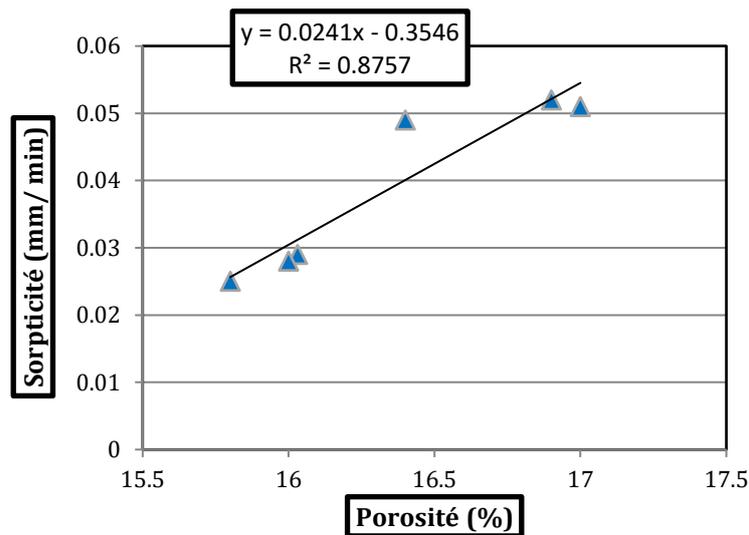


Fig. III-22. Evolution de la sorptivité en fonction de la porosité des mortiers testés

Conclusion générale :

L'intérêt majeur de cette étude est de préserver l'environnement en remplaçant une quantité du ciment par un déchet de la nature qui est la vase calcinée du barrage SEKKAK dans l'élaboration d'un mortier aux propriétés physique et mécanique similaire au mortier ordinaire à partir de l'interprétation des résultats obtenus les points suivants sont ressortis :

- En premier lieu, les caractéristiques de la vase étudiée démontrent qu'elle est considérée à caractère pouzzolanique avec un indice d'activité de 0,98. Cependant des mesures sur les pâtes de ciment étudiées on constate que la vase ajoutée influe sensiblement sur la consistance, celle-ci diminue avec la diminution du pourcentage de vase substitué.
- L'étude des propriétés physique du mortier c'est conclu par l'observation d'une influence proportionnelle de la vase calcinée sur la maniabilité, on déduit aussi de la mesure de la maniabilité que le taux de vase ajoutée accroît la demande en eau en raison de sa granulométrie fine. On remarque de la meure de l'air occlus que la quantité d'air introduite lors du processus de fabrication est élevée dans les mortiers au taux de vase de 15 à 25 %.
- L'augmentation de la substitution du ciment par de la vase calcinée a un effet significatif sur les caractéristiques mécaniques, plus le taux de substitution augmente la résistance mécanique à la traction ainsi qu'à la compression augmente spécialement remarquable sur le mortier à 20% de vase qui atteint les valeurs les plus élevées, on constate aussi que l'effet de l'ajout est plus visible sur le long terme notamment à 60 jours.
- L'incorporation de vase dans le mortier décroît la porosité, puisque ayant une finesse de mouture très élevée la vase comble les pores et empêche l'eau et l'air de s'introduire en grande quantité ce qui rend le mortier plus compacte. L'absorption capillaire confirme cela puisque on remarque des résultats obtenus que la quantité d'eau absorbée du mortier à 25 % de vase à 60 min d'une valeur de 0,2 g soit considérablement faible par rapport à celle du mortier témoin qui est de 0,43 g.
- La vitesse de propagation des ondes sonores montre que les mortiers de vase sont de meilleures qualités que le mortier témoin cela revient à la compacité

importante, cett dernière qui agit directement sur la résistance mécanique.

Ceci constitue des résultats intéressants dans l'optique de la substitution du ciment par un pourcentage de vase calcinée prélevée du barrage SEKKAK allant à 20 % dans des mortiers ordinaires et offre une solution à la pollution de l'environnement et l'améliore les propriétés physique et mécanique du matériau.

Perspectives

Les résultats obtenus jusqu'à maintenant permettent d'affirmer que la présence de vase calcinée confère au mortier une hausse des résistances, ainsi qu'une diminution porosité considérable. Le bénéfice de l'adjonction de vase peut être une solution où la lutte contre la pollution de l'environnement et l'amélioration des propriétés de matériau. Les indicateurs de la durabilité des mortiers a été abordée en première approche par des essais de porosité accessible à l'eau et de sorptivité. Il est cependant nécessaire d'envisager des études complémentaires sur la durabilité notamment sur des bétons ou sur des éprouvettes de tailles plus implorante. Il conviendra d'approfondir ces expérimentations et de les compléter par d'autres paramètres de durabilité tels que les cycles séchage/humidification, la carbonatation...etc.

Bibliographie.

- [1] A. Benali, "Eau : Le deuxième plus grand barrage d'Algérie « à sec » !," 2021. <https://www.algerie-eco.com/2021/05/12/eau-le-deuxieme-plus-grand-barrage-dalgerie-a-sec/>.
- [2] "owl apps." http://www.owlapps.net/owlapps_apps/articles?id=9156441.
- [3] M. Zait, "Des performances et des perspectives prometteuses," *Algérie Ind.*, p. 03, 2017.
- [4] I. Wikimedia Foundation, "Ciment," 2021. <http://www.ciment.wikibis.com/>.
- [5] "techno-science," p. <https://www.techno-science.net/glossaire-definitio>, 2021.
- [6] mohammed R. Kadri, S. Rouigueb, and hadjer abir Chikh, "Contribution à la réduction des émissions de CO2 et de la consommation énergétique dans l'industrie cimentaire par l'amélioration d'un système de production : Cas de la cimenterie de Béni-Saf," 2017.
- [7] L. Romains and L. Vicat, "1.1 Fabrication et propriétés des ciments," pp. 10–15, 1870.
- [8] Fouad.GHOMARI, "Science des matériaux:Ciment," 2006.
- [9] Unknown, "Le monde de GÉNIE CIVIL. Pratiquer le BTP facilement," 2018. .
- [10] P. Souchu, "Setec lerm," *La fabrication du ciment courant*, 2009. <http://doc.lerm.fr/la-fabrication-du-ciment-courant/>.
- [11] N. Benarab, "dz entreprise," *Entreprise, DZ*, 2021. https://www.dzentreprise.net/ciment-exportations-2021?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=ciment-exportations-2021.
- [12] GICA, "Le groupe industriel des ciments d'algérie," 2021. .
- [13] "APS Online," 2020. <https://www.aps.dz/economie/101999-ciment-forte-hausse-des-exportations-en-2019>.
- [14] S. Rebouh, "IMPACT DE LA POLLUTION DE L'AIR PROVOQUEE PAR LA CIMENTERIE TAHAR DJOUAD SUR LA SANTE PUBLIQUE ET LE CADRE BATI -CAS DE HAMMA BOUZIANE-," UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 2013.
- [15] M. T. Aoudia, "Les rejets atmosphériques dans le secteur de la production du ciment et leurs impacts sur l'environnement. Moyens d'évaluation et de contrôle," 2001.
- [16] COGITERRA, "Actu-Environnement," 2021. <https://www.actu-environnement.com/>.
- [17] M. Bouhidel, "APPLICATION D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) POUR UN DEVELOPPEMENT DURABLE : CAS DES CIMENTERIES ALGERIENNES," 2009.
- [18] B. Remini and D. Bensafia, "Envasement des barrages dans les regions arides : exemples algeriens," *Larhyss J.*, vol. 27, no. June 2020, pp. 63–90, 2016, [Online]. Available: <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/55353>.
- [19] B. Remini and D. Bensafia, "Envasement des barrages dans les regions arides exemples algeriens siltation of dams in arid regions algerian examples," no. November, pp. 63–90, 2016.

- [20] Grégoire Schneider, "Le curage des sédiments des cours d'eau," *Le Courr. l'environnement l'INRA*, 2005.
- [21] amine mohamed Zaoui, "Etude D'Optimisation De Devasement Par Dragage Des Barrages De L'Ouest D'Algerie."
- [22] B. Remini, "UNE NOUVELLE APPROCHE DE GESTION DE L' ENVAISEMENT DES BARRAGES," *Larhyss J.*, vol. 31, no. September 2017, pp. 51–81, 2017.
- [23] B. Remini and D. Bensafia, "Envasement des barrages dans les regions arides exemples algeriens siltation of dams in arid regions algerian examples," pp. 63–90, 2016.
- [24] "GUIDE TECHNIQUE," in [*Agence de l'eau de France 2002*], .
- [25] G. Schneider, "Le curage des sédiments des cours d'eau." <http://www7.inra.fr/dpenv/curage.htm>.
- [26] I. Berteau, S. Martin, and A. Vassiliadis, "Le curage des cours d'eau lorsque les sédiments contiennent des éléments-traces toxiques," *Le Courr. l'environnement l'INRA*, vol. 20, pp. 27–35.
- [27] K. Mehta, "Sulfate Attack on Concrete - A Critical Review," *Mater. Sci. Concr. III, Am. Ceram. Soc.*, pp. 105–130, 1993.
- [28] A. SEMCHA, "Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug,," p. 175, 2006.
- [29] Z. Boukhelif, "Propriétés mécanique des bétons autoplaçants à base des sédiments dragés," 2012.
- [30] H. Maarouf, "Valorisation des sédiments issus du dragage du barrage de Bouhanifia et du port d'Oran," 2018.
- [31] M. Santhanam, Menashi D. Cohen, and J. Olek, "Mechanism of sulfate attack: A fresh look: Part 1: Summary of experimental results," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 6, pp. 915–921, 2002.
- [32] S. Omar, "Optimisation de la formulation d'un éco-béton à base de sédiments de dragage et étude de sa résistance aux attaques chimiques »,," 2017.
- [33] T. B. NGUYEN, "Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédé NOVOSOL dans des matériaux d'assises de chaussée- Comportement mécanique et environnemental," 2008.
- [34] O. Belaribi, "Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzoloane," 2015.
- [35] "http://197.112.0.211/soudoud-dzair/index.php?action=esmap_vect&table=chahidgis_barrage&id=15." .
- [36] A. Boukhelkhal, "Matériaux cimentaires," *Man. des Trav. Prat. Univ. Yahia Fares, Médea*,

2016.

- [37] T. BOUBEKEUR, "MATERIAUX DE CONSTRUCTION," 2017.
- [38] P. (États-U. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, "Spécification standard pour les cendres volantes de charbon et la pouzzolane naturelle brute ou calcinée à utiliser comme adjuvant minéral dans le béton. Norme ASTM."
- [39] I. U. T. de G. C. de Saint Pierre, "Etude des ciments."
- [40] R. . Feldman and H. Cheng-Yi, "Properties of Portland I . Porosity and Surface Properties," *Cem. Concr. Res.*, vol. 15, pp. 765–774, 1985.
- [41] J. Baron and A. T. de l'Industrie des L. H. (France), *Les bétons : bases et données pour leur formulation*. 1999.
- [42] C. B. Sisman, E. Gezer, and I. Kocaman, "Effects of organic waste (rice husk) on the concrete properties for farm buildings," *Bulg. J. Agric. Sci.*, vol. 17, no. 1, pp. 40–48, 2011.
- [43] M. Lion, "Etude du lien entre sorptivité et capillarité pour différents types de bétons," *Congrè Français Mécanique 2019*, 2019.
- [44] T. Cheboub, "Contribution à l'étude des matériaux cimentaires contenant des inclusions végétales," 2021.

