



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

Abdelhamid Ibn Badis University of Mostaganem

كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculty of Sciences and Technology

قسم الهندسة المدنية

Department of Civil Engineering



N° d'ordre: M...../GC /2025

## Mémoire de Master académique

Filière: Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

### Influence des additions minérales (vase calcinée, fillers calcaires et perlite) sur la durabilité des mortiers

Présenté par :

**REKAB MOHAMED**

**ORIBI ZAKARIA**

**Présidente** : GUERZOU Torkia

MCA

UMAB Mostaganem

**Examineur** : BELARIBI OMAR

MCA

UMAB Mostaganem

**Encadrante** : BELAS Nadia

Professeure

UMAB Mostaganem

Année Universitaire : 2024 / 2025



## REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier **Le Tout-Puissant Allah** qui nous a guidés, soutenus et donné la force, la patience et la volonté d'accomplir ce modeste travail. **Alhamdoulillah**.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrante, **Professeure Mme Belas Nadia**, pour ses conseils avisés, sa disponibilité, et son accompagnement tout au long de cette recherche.

Nous adressons nos sincères remerciements à **Monsieur Belaribi Omar**, examinateur de ce mémoire, pour son accompagnement, ses remarques pertinentes et ses conseils enrichissants tout au long de notre parcours. Nos remerciements vont également à **Madame Guerzou Torkia**, présidente du jury, pour l'intérêt qu'elle a porté à notre travail, sa disponibilité et ses observations constructives lors de l'évaluation de ce mémoire.

Nous adressons aussi nos remerciements aux **techniciens des laboratoires**, pour leur assistance technique, leur disponibilité, et le matériel mis à notre disposition, qui ont été indispensables à la réalisation des essais.

Enfin, nous remercions chaleureusement **toutes les personnes ayant contribué à notre formation** au sein du Département de Génie Civil, ainsi que toutes celles qui, de près ou de loin, ont participé à la réussite de ce travail.

## **DEDICACE**

*À mes chers parents,  
Pour votre amour, vos sacrifices et votre soutien inconditionnel tout au long de  
mon parcours.*

*À ma famille,  
Pour votre présence constante, vos encouragements et votre patience.*

*À mon binôme **Oribi Zakaria**,  
Pour ta collaboration, ta rigueur et ton esprit d'équipe tout au long de ce  
travail.*

*À mon ami **Hamidi**,  
À tous les amis que j'ai eu la chance de rencontrer à l'université,  
Merci pour votre amitié sincère, votre bienveillance et les souvenirs  
inoubliables.*

*À toutes les personnes qui ont croisé mon chemin, de près ou de loin,  
Et qui ont contribué à ma réussite, je vous dédie ce modeste travail avec  
gratitude*

**MOHAMED**

## **DEDICACE**

*À mes parents bien-aimés,*

*Pour votre amour immense, vos sacrifices silencieux et votre soutien sans faille  
à chaque étape de ma vie.*

*À ma famille,*

*Pour votre présence rassurante, vos encouragements constants et votre patience  
bienveillante.*

*À mon binôme, **REKAB Mohamed,***

*Et mon ami, **DAHMANI khaireddine***

*Pour ton sérieux, ta persévérance et l'esprit d'équipe qui a marqué cette belle  
collaboration.*

*À tous les amis rencontrés sur les bancs de l'université,*

*Pour les moments partagés, l'amitié sincère et les souvenirs gravés dans le  
temps.*

*À tous ceux et celles qui, de près ou de loin, ont influencé ce parcours,*

*Je vous adresse toute ma reconnaissance à travers ce modeste travail.*

**ZAKARIA**

# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	1
DEDICACE.....	3
INTRODUCTION GENERALE .....	1
<b>PARTIE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ADDITIONS MINERALES.....</b>	<b>1</b>
<b>I.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>I.2. LES ADDITIONS MINERALES.....</b>	<b>1</b>
<b>I.2.1 Définition et Classification des Additions Minérales.....</b>	<b>2</b>
I.2.1.1 Additions Réactives .....	2
I.2.1.2 Additions Inertes (ou quasi-inertes).....	2
I.2.2 Origine et Principaux Types d'Additions Minérales .....	2
I.2.2.1 Additions Naturelles .....	2
I.2.2.2 Additions Industrielles (Sous-produits de l'Industrie).....	3
I.2.2.3 Additions Innovantes et Matériaux Alternatifs.....	3
I.2.3 Effets des Additions Minérales sur les Propriétés du Ciment et du Béton .....	3
I.2.3.1 Effets sur la Réactivité et l'Hydratation.....	3
I.2.3.2 <i>Effets sur les Propriétés Mécaniques</i> .....	3
I.2.3.3 <i>Effets sur la Durabilité</i> .....	3
I.2.3.4 Effets sur l'Impact Environnemental .....	4
I.2.4 Applications des Additions Minérales dans les Matériaux Cimentaires.....	4
I.2.5 Propriétés Physiques des Additions Minérales .....	4
I.2.5.1 Finesse (surface spécifique Blaine).....	4
I.2.5.2 Forme et texture des particules .....	5
I.2.5.3 Densité apparente.....	5
I.2.6 Propriétés Chimiques des Additions Minérales .....	6
I.2.6.1 Oxydes principaux .....	6
I.2.7 Rôle des Additions Minérales dans le Béton .....	6
I.2.7.1 À l'état frais .....	6
I.2.7.2 À l'état durci .....	7
1.2.8 Aspects Environnementaux.....	7
<b>I.3 LA PERLITE NATURELLE .....</b>	<b>7</b>

<b>I.3.1 Définition .....</b>	<b>7</b>
I.3.2 Origine de la perlite.....	8
I.3.3 Gisements mondiaux de perlite.....	8
I.3.4 Caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques de la perlite .....	8
I.3.4.1 Caractéristiques physiques de la perlite .....	9
I.3.4.2 Caractéristiques chimiques de la perlite .....	10
I.3.5 L'activité pouzzolanique de la perlite .....	11
I.3.5.1 Perlite naturelle vs perlite expansée.....	12
I.3.6 Réserves, production et consommation de la perlite dans le monde .....	12
I.3.7 La perlite en Algérie .....	13
I.3.7.1 Exploitation industrielle actuelle .....	14
I.3.7.2 Usages actuels et potentiels.....	15
I.3.7.3 Études et recherches locales.....	15
I.3.7.4 Perspectives économiques.....	16
<b>I.4 LES SEDIMENTS DE DRAGAGE .....</b>	<b>16</b>
I.4.1 Origine et définition.....	16
I.4.2 Constitution des sédiments .....	17
I.4.3. Le dragage des sédiments .....	17
I.4.4. La valorisation des sédiments de dragage.....	19
1.4.4.1 Valorisation dans le béton et mortier .....	19
<b>I.5 FILLERS CALCAIRES.....</b>	<b>21</b>
I.5.1 Définition .....	21
I.5.2 Propriétés du filler calcaire .....	22
I.5.3 L'utilisation Des Fillers Calcaires.....	23
I.5.4 Le rôle des fillers calcaires.....	23
I.5.5 Influence des fillers calcaires sur les propriétés des mortiers .....	24
I.5.6 Fillers calcaires et durabilité .....	24
<b>I.6 CONCLUSION .....</b>	<b>25</b>
<b>CHAPITRE II : LA DURABILITE .....</b>	<b>26</b>
<b>II.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>26</b>
<b>II.2. LES ATTAQUES ACIDES .....</b>	<b>27</b>
II.2.1 Les différentes sources d'environnement acide.....	27
II.2.1.1 Les pluies acides .....	27

II.2.1.2. Les acides minéraux .....	28
II.2.1.3. Les acides organiques .....	28
II.2.2 Mécanisme d'attaque acide des matrices cimentaires .....	28
II.2.3 Influence des additions minérales sur la résistance des mortiers aux attaques acides.....	29
<b>II.3. LA CARBONATATION .....</b>	<b>32</b>
I.3.1. Les mécanismes de carbonatation.....	32
I.3.2. Effets des additions minérales sur la carbonatation des mortiers .....	33
<b>II.4. CONCLUSION.....</b>	<b>37</b>
<b>PROBLEMATIQUE.....</b>	<b>39</b>
<b>PARTIE II : MATERIAUX, METHODES EXPERIMENTALES ET RESULTATS...40</b>	
<b>CHAPITRE I : MATERIAUX.....</b>	<b>41</b>
<b>I.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>41</b>
<b>I.2 CIMENT.....</b>	<b>41</b>
<b>I.3. LES SÉDIMENTS DE DRAGAGE .....</b>	<b>42</b>
I.3.1 Caractéristiques physiques des sédiments .....	44
<b>I.4 LA PERLITE NATURELLE .....</b>	<b>45</b>
<b>I.5 LES FILLERS CALCAIRES .....</b>	<b>46</b>
<b>I.6 SABLE NORMALISE.....</b>	<b>47</b>
<b>I.7 ADJUVANT .....</b>	<b>47</b>
<b>I.8 CONCLUSION .....</b>	<b>48</b>
<b>CHAPITRE II : METHODES EXPERIMENTALES.....</b>	<b>50</b>
<b>II.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>50</b>
<b>II.2 Formulation des mortiers .....</b>	<b>50</b>
<b>II.3 ESSAIS DURABILITE.....</b>	<b>51</b>
II.3.1 Essais d'attaques acides.....	52
II.3.1.1 Acide sulfurique (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) .....	52
II.3.1.2 Préparation des solutions .....	52
II.3.1.3 Calculs des volumes de solution acide et des volumes d'acide sulfurique à ajouter.....	54
II.3.1.4 La perte de masse.....	55
II.3.2 Essais de carbonatation.....	57
<b>II.4 CONCLUSION.....</b>	<b>59</b>
<b>CHAPITRE III : RESULTATS .....</b>	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

<b>III.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>62</b>
<b>III.2. RESULTATS DES ATTAQUES ACIDES.....</b>	<b>62</b>
III.2.1 Perte de masse .....	62
II.2.2 Analyse de l'évolution de la perte de masse des mortiers en milieu acide ( $H_2 SO_4$ ).....	65
<b>III.3. RESULTATS DE CARBONATATION .....</b>	<b>69</b>
<b>III.4 CONCLUSION .....</b>	<b>72</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>73</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau n°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau I.1</b>	La densité des additions minérales	5
<b>Tableau I.2</b>	Oxydes principaux des additions minérales	6
<b>Tableau I.3</b>	Propriétés physiques de la perlite brute	9
<b>Tableau I.4</b>	Composition chimique typique de la perlite brute	10
<b>Tableau I.5</b>	Réserves et productions mondiales de la perlite (en milliers de tonnes)	12
<b>Tableau I.6</b>	Principaux gisements de la perlite en Algérie	13
<b>Tableau I.7</b>	Propriétés requises du filler calcaire pour les applications en ciment et béton	21
<b>Tableau I.8</b>	Compositions des mortiers (ajout de perlite)	29
<b>Tableau I.9</b>	Compositions des mortiers (ajout de fillers calcaires)	30
<b>Tableau I.10</b>	Compositions des mortiers (ajout de pouzzolane de Béni-Saf)	31
<b>Tableau I.11</b>	Compositions des mortiers à base de combinaisons ternaires	34
<b>Tableau I.12</b>	Compositions des mortiers utilisés pour l'essai de carbonatation	36
<b>Tableau II.1</b>	Compositions chimiques du ciment CEM I 42,5 analysées par XRF (% en poids)	41
<b>Tableau II.2</b>	Caractérisation physique du ciment	42
<b>Tableau II.3</b>	Composition minéralogique du clinker	42
<b>Tableau II.5</b>	Masses volumiques des sédiments du barrage de Chorfa II	44
<b>Tableau II.6</b>	Composition chimique de la perlite naturelle	45
<b>Tableau II.7</b>	Composition chimique des fillers calcaires	46
<b>Tableau II.8</b>	Caractéristiques de l'adjuvant PLASTIMENT® BV 40	47
<b>Tableau II.9</b>	Composition des mortiers témoins et mortiers avec additions	50
<b>Tableau II.10</b>	Évolution de la masse (g) des mortiers dans une solution d'acide sulfurique (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) sur 9 semaines	63
<b>Tableau II.13</b>	Profondeurs mesurées de carbonatation (mm)	69
<b>Tableau II.14</b>	Résultats des mesures de profondeur de carbonatation	69

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1:</b> Image montrant différentes couleurs de la perlite (3) .....	9
<b>Figure I.2.</b> Les Différents Degrés De Perlite (5) .....	10
<b>Figure I.3.</b> Localisation des ajouts pouzzolaniques selon le graphe de Frattini (8) .....	12
<b>Figure I.4.</b> Gisement Bab à Hammam Boughrara (Tlemcen) (10).....	14
<b>Figure I.5</b> Perlite naturelle (a), concassée (b), broyée (c)(14).....	16
<b>Figure I.6</b> Engin mécanique de dragage (15) .....	18
<b>Figure I.7</b> Les Bassins de décantations des sédiments dragués du barrage Bouhanifia avant et après l'opération de dragage (18) .....	21
<b>Figure I.8</b> Filler calcaire (25) .....	22
<b>Figure I.9</b> Illustration de l'effet filler .....	23
<b>Figure I.10</b> Evolution de la perte de masse des mortiers à base de perlite en fonction de la période d'immersion dans la solution d'HCl (20).....	30
<b>Figure I.11</b> Evolution de la perte de masse des mortiers à base de perlite en fonction de la période d'immersion dans la solution d'H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (20).....	30
<b>Figure I.12</b> Evolution de la perte du poids des mortiers aux fines calcaires en fonction de la période d'immersion en 5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (21) .....	31
<b>Figure I.13</b> Evolution de la perte du poids des mortiers à la pouzzolane de Béni- Saf en fonction de la période d'immersion en 5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (21) .....	32
Figure I.14 Mécanisme de carbonatation de Ca(OH) <sub>2</sub> (22).....	33
<b>Figure I.15</b> Profondeur de carbonatation (projection de phénolphtaléine) en fonction de la racine du temps (CEM I/42.5) : mode A.F.P.C.-A.F.R.E.M.(23) .....	35
<b>Figure I.16</b> Profondeur de carbonatation (projection de phénolphtaléine) en fonction de la racine du temps (CEM II/42.5) mode A.F.P.C.-A.F.R.E.M (23).....	35
<b>Figure II.17</b> Les éprouvettes après 9 semaines d'immersion dans la solution d'acide H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ....	68

## RESUME

Dans le cadre de ce mémoire, une étude expérimentale a été menée pour évaluer l'influence de certaines additions minérales sur la durabilité des mortiers de ciment. Plusieurs formulations ont été élaborées à base de ciment Portland, avec des substitutions partielles intégrant respectivement 5 % de perlite naturelle, 15 % de filler calcaire et 15 % de sédiments de dragage. Les échantillons de forme  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ , ont été soumis à deux essais principaux : une exposition prolongée à un milieu acide à base de 2% d'acide sulfurique ( $\text{H}_2 \text{SO}_4$ ) pour mesurer la perte de masse, et un essai de carbonatation naturelle visant à quantifier la profondeur de pénétration du  $\text{CO}_2$ .

Les résultats ont montré que les formulations contenant ces additions présentent une meilleure résistance à l'agression acide, notamment grâce à une porosité réduite et une compacité améliorée de la matrice cimentaire. Les formulations combinant les trois ajouts (5 % perlite + 15 % filler calcaire + 15 % sédiments) ont offert les performances les plus élevées.

En revanche, bien que les sédiments seuls aient montré une bonne résistance à la carbonatation, l'ajout de perlite et de filler calcaire a entraîné une augmentation progressive de la profondeur carbonatée, traduisant une sensibilité accrue aux environnements riches en dioxyde de carbone.

**Mots-clés :** Durabilité, mortier, perlite, filler calcaire, sédiments de dragage, milieu acide, carbonatation

## ABSTRACT

This study involved an experimental investigation aimed at evaluating the effect of specific mineral additions on the durability of cement mortars. Several formulations were prepared using Portland cement partially replaced with 5% natural perlite, 15% limestone filler, and 15% dredged sediments.

The mortars samples (4x4x16 cm<sup>3</sup>) are subjected to two main tests: the first was prolonged exposure to an acidic environment based on 2% of sulfuric acid (H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> ) to assess mass loss; the second involved natural carbonation testing to determine Carbon dioxide penetration depth. The results revealed that mortars containing these additions exhibited improved resistance to acid attack, mainly due to reduced porosity and enhanced matrix compactness.

The best performance was recorded by the combined formulation (5% perlite + 15% limestone filler + 15% sediments). However, while sediments alone showed good carbonation resistance, the addition of perlite and limestone filler progressively increased carbonation depth, indicating higher sensitivity in CO<sub>2</sub> -rich environments.

**Keywords :** Durability, mortar, perlite, limestone filler, dredged sediments, acidic environment, carbonation

## ملخص

تم في هذا البحث إجراء دراسة تجريبية تهدف إلى تقييم تأثير بعض الإضافات المعدنية على متانة ملاط الإسمنت. وقد تم تحضير عدة تركيبات باستخدام الإسمنت البورتلاندي كأساس، مع تعويض جزئي بواسطة 5% من البيرلايت الطبيعي، 15% من نواعم الكلس، و15% من رواسب التجريف.

شكّلت العينات على شكل 4x4x16 سم<sup>3</sup> وتم إخضاعها لتجربتين رئيسيتين: الأولى هي تعرّض طويل الأمد لوسط حمضي مكوّن من 2 % حمض الكبريتيك، لقياس فقدان الكتلة كمؤشر على التدهور؛ والثانية تجربة كربنة طبيعية لقياس مدى تغلغل غاز ثاني أكسيد الكربون.

أظهرت النتائج أن التركيبات التي تحتوي على هذه الإضافات أبدت مقاومة أفضل ضد التدهور الحمضي، بفضل انخفاض المسامية وزيادة التماسك الداخلي للملاط. وقد سجلت التركيبة (5% بيرلايت + 15% حشو كلسي + 15% رواسب) أعلى أداء في مقاومة الأوساط العدوانية.

أما فيما يخص الكربنة، فقد أظهرت التركيبات المعتمدة على الرواسب فقط مقاومة جيدة، بينما أدى إدراج البيرلايت و نواعم الكلس إلى زيادة تدريجية في عمق الكربنة، مما يشير إلى قابلية أكبر للتأثر في البيئات الغنية بغاز ثاني أكسيد الكربون.

## الكلمات المفتاحية

الديمومة، الملاط، البيرلايت، و نواعم الكلس، رواسب التجريف، الوسط الحمضي، الكربنة.

## INTRODUCTION GENERALE

Dans un contexte de développement durable et de transition écologique, le secteur de la construction est appelé à repenser ses pratiques afin de limiter son impact environnemental, tout en maintenant la performance et la durabilité des ouvrages. Le ciment Portland, principal liant utilisé dans la fabrication du béton et du mortier, est fortement énergivore et émetteur de gaz à effet de serre, notamment lors de la cuisson du clinker. Face à ces enjeux, l'incorporation d'additions minérales dans les formulations cimentaires s'impose comme une solution prometteuse.

Ces additions, qu'elles soient naturelles, industrielles ou issues de la valorisation de déchets, permettent non seulement de réduire la quantité de clinker utilisée, mais aussi d'améliorer certaines propriétés des matériaux, telles que la durabilité, la compacité, et la résistance aux agressions chimiques. Parmi ces matériaux alternatifs, la perlite (matériau volcanique), les fillers calcaires (issus du calcaire broyé) et les sédiments de dragage (matériaux fins valorisables) suscitent un intérêt croissant pour leurs performances techniques et leur disponibilité locale.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique de valorisation des ressources minérales alternatives, en étudiant l'effet de ces additions sur les propriétés des mortiers, notamment en termes de durabilité face à la carbonatation et aux attaques acides. À travers une étude expérimentale approfondie, ce travail vise à évaluer la faisabilité technique et les performances environnementales de formulations innovantes intégrant ces matériaux, en vue de leur application dans le domaine du génie civil.

Ce mémoire est structuré en deux parties. La première partie, à caractère bibliographique, comprend deux chapitres : le chapitre I présente les différentes additions minérales utilisées dans les matériaux cimentaires (perlite, sédiments calcinés, fillers calcaires), leurs propriétés physiques et chimiques, ainsi que leur influence sur les performances mécaniques et environnementales des mortiers ; le chapitre II traite des mécanismes de durabilité, notamment la carbonatation et les attaques acides, en lien avec l'effet des additions. La deuxième partie, expérimentale, comporte également trois chapitres : le chapitre I décrit les matériaux mis en œuvre ; le chapitre II expose la méthodologie adoptée et les essais réalisés (carbonatation, attaque acide) ; enfin, le chapitre III présente les résultats et leur interprétation, en évaluant l'influence des ajouts minéraux sur la durabilité des mortiers.

**PARTIE I :**  
**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ADDITIONS MINERALES**

### **I.1. INTRODUCTION**

Dans le domaine des matériaux de construction, l'incorporation d'additions minérales est une pratique courante visant à améliorer les propriétés des liants hydrauliques et à optimiser leur performance. Ces additions, qu'elles soient naturelles ou artificielles, jouent un rôle essentiel dans la durabilité, la résistance mécanique et la réactivité des mélanges cimentaires.

Ce chapitre se focalise sur les différentes catégories d'additions minérales, avec une attention particulière sur les fillers calcaires, les sédiments et la perlite. Tout d'abord, nous examinerons les propriétés et les avantages des additions calcaires, largement utilisées dans la production du ciment et du béton pour leur contribution à l'optimisation des formulations et à la réduction de l'empreinte environnementale. Ensuite, nous explorerons l'intérêt des sédiments en tant que matériau potentiellement valorisable, en mettant en avant leur composition et leur impact sur les performances mécaniques des mélanges cimentaires. Enfin, la perlite, un matériau d'origine volcanique, sera abordée pour ses applications spécifiques, notamment en tant qu'additif léger conférant une meilleure isolation thermique et une réduction de la densité des matériaux de construction.

À travers cette analyse, nous mettrons en évidence l'apport de ces matériaux dans le domaine du génie civil et leur impact sur la durabilité et l'efficacité des structures modernes.

### **I.2. LES ADDITIONS MINERALES**

Dans l'industrie des matériaux de construction, l'optimisation des performances mécaniques, chimiques et environnementales des bétons et ciments est un enjeu majeur. Les additions minérales, intégrées dans les formulations cimentaires, permettent d'améliorer la durabilité, la résistance mécanique et la maniabilité des matériaux tout en réduisant leur impact environnemental.

Avec l'évolution des réglementations visant à limiter les émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation de ressources naturelles, l'utilisation d'additions minérales est devenue une solution incontournable pour réduire la part de clinker dans le ciment et optimiser la production de bétons performants et durables. Ce chapitre explore en détail la nature, la classification, les rôles et les effets des additions minérales dans les matériaux cimentaires.

### **I.2.1 Définition et Classification des Additions Minérales**

Les additions minérales sont des matériaux pulvérulents d'origine naturelle ou industrielle incorporés aux liants hydrauliques dans le but d'en améliorer certaines propriétés mécaniques, physiques et chimiques. Elles sont utilisées soit en tant que composants majeurs du liant (dans les ciments composés), soit comme adjuvants dans les bétons et mortiers (35) .

Selon la norme NF EN 206-1, les additions minérales peuvent être classées en deux grandes catégories :

#### ***I.2.1.1 Additions Réactives***

Ces additions participent activement aux réactions d'hydratation du ciment et contribuent au développement des résistances mécaniques et de la durabilité des bétons. Elles peuvent être :

- **Pouzzolaniques** : riches en silice et alumine amorphes, elles réagissent avec la chaux libérée par l'hydratation du clinker pour former des silicates et aluminates de calcium hydratés, similaires aux produits d'hydratation du ciment Portland. Exemples : cendres volantes, pouzzolanes naturelles, fumée de silice.
- **Hydrauliques latentes** : ces matériaux ont une activité hydraulique faible à l'état naturel mais peuvent être activés en milieu alcalin ou en présence de sulfate de calcium. Exemple : laitier de haut fourneau.

#### ***I.2.1.2 Additions Inertes (ou quasi-inertes)***

Ces additions n'ont pas d'effet chimique significatif sur la prise et l'hydratation du ciment mais améliorent certaines propriétés physiques du mélange, notamment la compacité et la rhéologie. Elles sont souvent constituées de carbonate de calcium, de quartz finement broyé ou de certaines argiles. Exemples : fillers calcaires, certaines argiles calcinées, sédiments naturels.

### **I.2.2 Origine et Principaux Types d'Additions Minérales**

Les additions minérales peuvent être classées selon leur origine (35) (36) .

#### ***I.2.2.1 Additions Naturelles***

- **Pouzzolanes naturelles** : roches volcaniques riches en silice et alumine, ayant des propriétés pouzzolaniques favorisant la formation de C-S-H.
- **Calcaires broyés (fillers calcaires)** : utilisés principalement pour améliorer la rhéologie et la compacité des bétons.

### *1.2.2.2 Additions Industrielles (Sous-produits de l'Industrie)*

- **Cendres volantes** : sous-produit de la combustion du charbon dans les centrales thermiques, elles possèdent une activité pouzzolanique et améliorent la durabilité des bétons.
- **Fumée de silice** : issue de l'industrie métallurgique (production du silicium et du ferrosilicium), elle permet d'obtenir des bétons très résistants et denses.
- **Laitier de haut fourneau** : sous-produit de l'industrie sidérurgique, il est utilisé comme addition hydraulique pour améliorer la durabilité des bétons.

### *1.2.2.3 Additions Innovantes et Matériaux Alternatifs*

- **Sédiments naturels** : matériaux issus de processus géologiques pouvant être valorisés comme additions cimentaires.
- **Perlite** : matériau volcanique expansé utilisé principalement pour ses propriétés d'isolation thermique et de légèreté dans le béton.

## **1.2.3 Effets des Additions Minérales sur les Propriétés du Ciment et du Béton**

### *1.2.3.1 Effets sur la Réactivité et l'Hydratation*

Les additions réactives, en particulier les pouzzolanes, la fumée de silice et les cendres volantes, réagissent avec la chaux libérée ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) lors de l'hydratation du ciment, formant du C-S-H additionnel, ce qui améliore la résistance mécanique et réduit la porosité.

Les additions inertes, comme les fillers calcaires, n'interviennent pas chimiquement dans l'hydratation mais influencent la répartition des particules solides et la microstructure.

### *1.2.3.2 Effets sur les Propriétés Mécaniques*

Les additions réactives améliorent la résistance mécanique à long terme grâce aux réactions secondaires générant du C-S-H supplémentaire.

L'effet de dilution des additions inertes peut légèrement réduire la résistance initiale mais améliorer la compacité et la durabilité.

### *1.2.3.3 Effets sur la Durabilité*

Les effets des additions minérales sur la durabilité sont :

- Réduction de la porosité et amélioration de l'imperméabilité aux agents agressifs (sulfates, chlorures, carbonatation).

- Meilleure résistance aux cycles gel/dégel grâce à une réduction de la porosité capillaire.
- Atténuation de la réaction alcali-silice en limitant la quantité de chaux libre disponible pour réagir avec les agrégats réactifs.

#### ***1.2.3.4 Effets sur l'Impact Environnemental***

Les effets des additions minérales sur l'environnement sont

- Réduction de la consommation de clinker, diminuant ainsi les émissions de CO<sub>2</sub> issues de la fabrication du ciment.
- Valorisation de sous-produits industriels, contribuant à l'économie circulaire et à la gestion durable des ressources (37).

#### **1.2.4 Applications des Additions Minérales dans les Matériaux Cimentaires**

Les additions minérales sont utilisées dans divers types de bétons et ciments adaptés à des applications spécifiques :

- **Bétons à haute performance (BHP)** : forte résistance, faible porosité, durabilité accrue.
- **Bétons autoplaçants (BAP)** : fluidité optimisée grâce aux fillers calcaires et fumée de silice.
- **Bétons routiers** : incorporation de cendres volantes pour limiter la fissuration et améliorer la résistance aux cycles gel/dégel.
- **Ciments composés (CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V)** : formulations optimisées en fonction du type d'addition et de son effet sur les performances du ciment.

#### **1.2.5 Propriétés Physiques des Additions Minérales**

Les propriétés physiques jouent un rôle déterminant dans l'influence des additions sur le béton, notamment en ce qui concerne la rhéologie, la compacité, et la durabilité (36).

##### ***1.2.5.1 Finesse (surface spécifique Blaine)***

La finesse est essentielle pour l'activité pouzzolanique. Plus une addition est fine, plus sa réactivité est grande.

- **Fumée de silice : 15 000–30 000 cm<sup>2</sup>/g**

- **Laitier** : 4 000–6 000 cm<sup>2</sup>/g
- **Cendres volantes** : 2 500–5 000 cm<sup>2</sup>/g
- **Filler calcaire** : 2 000–3 500 cm<sup>2</sup>/g

#### *1.2.5.2 Forme et texture des particules*

- **Sphériques** : cendres volantes → effet "bille" qui améliore la fluidité.
- **Anguleuses** : méta-kaolin, perlite → augmentent la viscosité.
- **Poreuses** : perlite → capacité d'absorption d'eau importante.

#### *1.2.5.3 Densité apparente*

La densité des additions minérales est un paramètre essentiel qui influence le comportement des matériaux cimentaires, notamment en termes de maniabilité, de stabilité et de performance mécanique. Le tableau suivant résume les densités typiques de différentes additions utilisées dans le béton.

**Tableau I.1.** La densité des additions minérales (1)

Addition	Densité
Fumée de silice	~2.2
Laitier	~2.9
Cendres volantes	~2.3–2.6
Filler calcaire	~2.7
Perlite expansée	~0.1–0.2 (très léger)
Sédiments traités	1.8–2.5 (variable)

## I.2.6 Propriétés Chimiques des Additions Minérales

La composition chimique détermine si une addition est **réactive** ou non avec les produits d'hydratation du ciment.

### I.2.6.1 Oxydes principaux

Afin de mieux comprendre les caractéristiques chimiques des différentes additions minérales, le tableau suivant présente la composition en oxydes principaux de quelques ajouts fréquemment utilisés. Cette comparaison permet d'évaluer leur potentiel pouzzolanique, leur réactivité et leur rôle dans les matériaux cimentaires.

**Tableau I.2.** Oxydes principaux des additions minérales (2)

Addition	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Activité
Fumée de silice	> 85	< 1	< 1	< 1	Très pouzzolanique
Laitier	30–40	10–15	0–1	35–45	Hydraulique latente
Cendres volantes	40–60	10–30	4–10	1–10	Pouzzolanique
Méta-kaolin	> 50	> 40	< 1	< 2	Très réactif
Filler calcaire	< 5	< 1	< 1	> 50	Inactif
Perlite	70–75	12–15	1–2	1–5	Faiblement pouzzolanique

## I.2.7 Rôle des Additions Minérales dans le Béton

### I.2.7.1 À l'état frais

- **Amélioration de l'ouvrabilité** : grâce à l'effet lubrifiant des particules fines.
- **Réduction du ressuage et de la ségrégation.**

- **Modification de la rhéologie** : certaines additions comme la perlite augmentent la viscosité.

#### *1.2.7.2 À l'état durci*

- **Amélioration de la résistance mécanique à long terme** : principalement par formation secondaire de C-S-H (silicate de calcium hydraté).
- **Réduction de la perméabilité** : meilleure compacité.
- **Amélioration de la durabilité** : résistance aux attaques chimiques (sulfates, chlorures, carbonatation).

### **1.2.8 Aspects Environnementaux**

L'intégration des additions minérales contribue à :

- **La réduction des émissions de CO<sub>2</sub>** (moins de clinker utilisé).
- **La valorisation de déchets industriels et naturels.**
- **La limitation de l'exploitation de ressources primaires.**

## **I.3 LA PERLITE NATURELLE**

### **I.3.1 Définition**

La perlite est une roche volcanique naturelle formée de lave siliceuse ou de cendre. En raison d'un refroidissement rapide, la lave ou les cendres se solidifient en une roche vitreuse. Pendant des dizaines de milliers d'années, les eaux de surface et souterraines emprisonnées dans la roche se retrouvent piégées dans une structure semblable à celle du verre. Lorsqu'elle est chauffée à haute température (750 à 1250 °C) (38), la perlite se dilate de quatre à vingt fois son volume d'origine sous l'effet de l'évaporation de l'eau. La pierre volcanique éclate comme du pop-corn, ce qui entraîne la formation d'innombrables petites bulles d'air. Cette porosité confère à la perlite des propriétés physiques remarquables telles qu'une faible conductivité thermique ainsi qu'une incroyable légèreté pour la perlite expansée.

### **I.3.2 Origine de la perlite**

La perlite est un verre non cristallin se composant généralement de 70 à 75 % de dioxyde de silicium, 12 à 15 % d'oxyde d'aluminium, 3 à 5 % d'oxyde de potassium et 3 à 4 % d'oxyde de sodium. Elle présente également des traces d'oxyde de fer, d'oxyde de magnésium et d'oxyde de calcium.

### **I.3.3 Gisements mondiaux de perlite**

La perlite est présente dans les régions volcaniques du monde entier. Les principaux producteurs sont :

- **Grèce** (notamment l'île de Milos) : l'un des plus grands exportateurs mondiaux.
- **Turquie** : riche en formations volcaniques, elle possède d'importants gisements.
- **États-Unis** : surtout dans l'ouest (Nouveau-Mexique, Arizona).
- **Hongrie, Arménie, Russie, Mexique** : producteurs secondaires mais significatifs.

### **I.3.4 Caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques de la perlite**

La composition chimique des différentes variétés de perlites est déterminée par les processus de différenciation ayant eu lieu dans le magma au cours de son ascension, tandis que leur composition minéralogique est conditionnée par la vitesse ascensionnelle du magma, les paramètres thermiques et les conditions de solidification de la roche.

La perlite moins hydratée ou moins perlitisée a une couleur noire et la perlite plus hydratée ou perlitisée prend la couleur grise avec la présence des perles en verre.



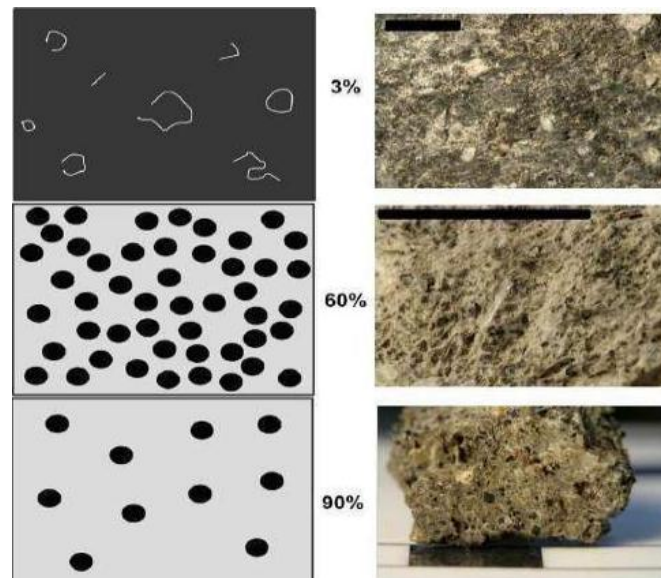
**Figure I.1:** Image montrant différentes couleurs de la perlite (3)

#### *1.3.4.1 Caractéristiques physiques de la perlite*

Les plus importantes propriétés physiques de la perlite sont énumérées dans le tableau suivant.

**Tableau I.3.** Propriétés physiques de la perlite brute (4)

Désignation	Propriété	Désignation	Propriété
Couleur	Grise, brune, noire, verte	Dureté	5.5 à 7 (échelle de Mohs)
Masse volumique absolue	2.3 à 2.8 g/cm <sup>3</sup>	Point de fusion	1260 à 1343 °C
Masse volumique apparente	1.2 à 2.35 g/cm <sup>3</sup>	Température d'expansion	600 à 1100 °C
Rapport d'expansion	10 à 20 (en volume)	Rétention d'eau	35 à 50 %
Ph	6.5 à 8.0	Densité	2.2 à 2.4
Densité apparente	32 à 400 kg/m <sup>3</sup>	Chaleur spécifique	387 J/kg·K
Point de ramollissement	871 à 1093 °C	Conductivité thermique	0.04 à 0.06 W/m·K (à 24 °C)



**Figure I.2.** Les Différents Degrés De Perlite (5)

#### *I.3.4.2 Caractéristiques chimiques de la perlite*

La composition chimique typique de la perlite brute est montrée dans le tableau I.5. Il apparaît une prédominance de la silice, élément déclencheur de la réaction pouzzolanique, suivie de l'alumine.

**Tableau I.4.** La composition chimique typique de la perlite brute (6)

Élément	Formule chimique	Teneur (%)
Silice	SiO <sub>2</sub>	71,0 à 75,0
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,5 à 16,0
Oxyde de sodium	Na <sub>2</sub> O	2,9 à 4,0
Oxyde de potassium	K <sub>2</sub> O	4,0 à 5,0
Oxyde de calcium	CaO	0,2 à 0,5
Oxyde de fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5 à 1,45
Oxyde de magnésium	MgO	0,03 à 0,5
Eau liée	H <sub>2</sub> O	3,05 à 5,16

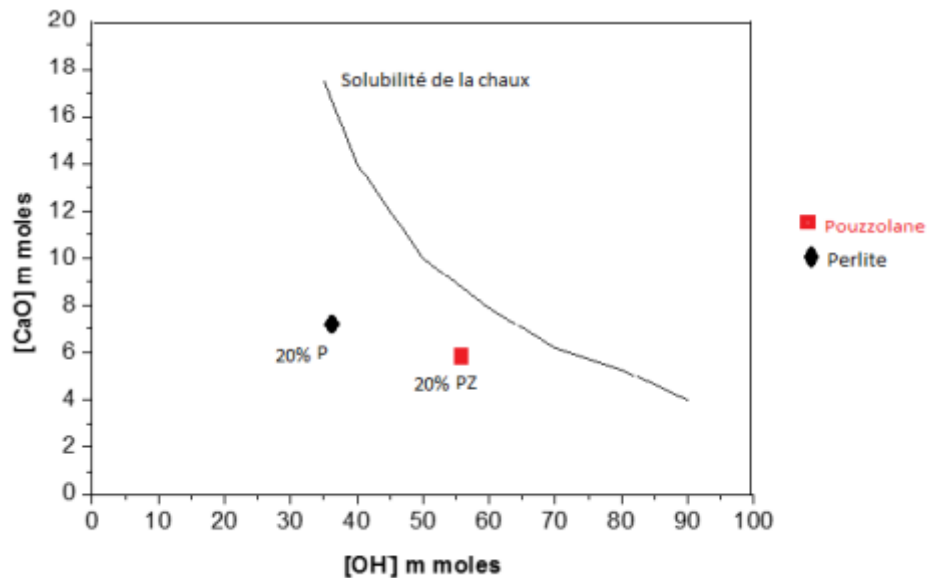
### I.3.5 L'activité pouzzolanique de la perlite

La perlite est une roche volcanique amorphe très riche en silice et en alumine, ce qui en fait un matériau classable parmi les pouzzolanes naturelles. Sous forme brute, elle contient de l'eau liée ; lorsqu'elle est chauffée à des températures comprises entre 900 et 1200 °C, elle subit une expansion rapide pour devenir de la perlite expansée (EP), un solide très poreux. Une fois broyée, cette perlite (qu'elle soit naturelle ou expansée) peut réagir avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et autres hydrates, agissant ainsi comme un liant secondaire.

D'un point de vue normatif, sa composition chimique (teneur en  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  supérieure à 70 %, faible teneur en CaO libre) répond aux critères généraux des pouzzolanes définis par les normes EN 196-5, EN 450-1 et ASTM C618. Cependant, l'activité pouzzolanique effective de la perlite dépend fortement de ses caractéristiques physiques, notamment la finesse de broyage et les traitements d'activation éventuels.

D'autres chercheurs (7) ont étudié l'influence de 5% de filler calcaire (mortier témoin), 5% de la perlite et 5% de cendre volante comme substitution en poids de ciment, par l'analyse DRX, ATG/TD et les photos MEB. Ils ont trouvé qu'à 28 jours, les hydrates dans les trois mortiers sont les mêmes (portlandite, CSH et ettringite), avec une diminution de la portlandite dans les mortiers à base de perlite et de la cendre volante par rapport au mortier de référence, cela est due à l'activité pouzzolanique de ces deux ajouts.

Hamadache (8) a testé l'activité pouzzolanique de la perlite et de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf selon la norme NF EN196-5. La perlite satisfait à l'essai de pouzzolanité, le point tracé se trouve au-dessous de la courbe de concentration de saturation d'ions calcium (Figure I.3).



**Figure I.3.** Localisation des ajouts pouzzolaniques selon le graphe de Frattini (8)

### ***I.3.5.1 Perlite naturelle vs perlite expansée***

Chimiquement, la perlite naturelle et la perlite expansée sont similaires, constituées d'un verre aluminosilicaté. Toutefois, la perlite naturelle a une structure dense et contient encore de l'eau, alors que la perlite expansée est très poreuse et anhydre. Cette porosité, bien qu'utile pour certaines applications isolantes, limite sa réactivité pouzzolanique, sauf si elle est préalablement broyée finement. Dans ce cas, elle peut être considérée comme une pouzzolane artificielle.

Des études (7) ont montré que la perlite broyée, naturelle ou expansée, pouvait atteindre un indice d'activité pouzzolanique de 49 % à 28 jours, et jusqu'à 63 % à 90 jours, ce qui reste inférieur à celui des fumées de silice (92 – 96 %) ou des cendres volantes (70 – 80 %).

### **I.3.6 Réserves, production et consommation de la perlite dans le monde**

Le tableau I.5 présente un aperçu des réserves et productions mondiales de perlite en 2023, mettant en évidence les principaux pays producteurs tels que les États-Unis, la Grèce, la Turquie, l'Iran, la Hongrie et l'Arménie.

**Tableau I.5 Réserves et productions mondiales de la perlite (mille tonne) (9)**

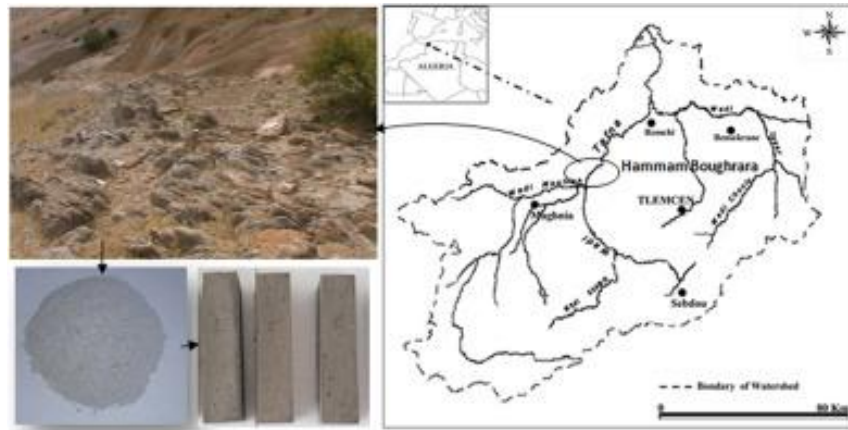
<b>Pays</b>	<b>Réserves estimées (millions de tonnes)</b>	<b>Production annuelle (milliers de tonnes)</b>
Grèce	120	~700
Iran	73	Non disponible
Turquie	57	Non disponible
États-Unis	50	650
Hongrie	50	Non disponible
Arménie	165 (env. 150 millions m <sup>3</sup> )	Non disponible
<b>Autres pays</b>	~185	Non disponible
<b>Total mondial</b>	~700	~2 000 (approximatif)

Le marché mondial de la perlite est estimé à 1,5 milliard de dollars en 2023 et devrait atteindre 1,9 milliard de dollars d'ici 2030, avec un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 3,6%. Cette croissance est principalement stimulée par la demande accrue dans les secteurs de la construction, de l'horticulture et des applications industrielles, en raison des propriétés uniques de la perlite, telles que sa légèreté, sa résistance au feu et son innocuité.

### **I.3.7 La perlite en Algérie**

La perlite est une roche volcanique vitreuse, issue du refroidissement rapide de laves riches en silice. En Algérie, elle est associée à des formations rhyolitiques situées principalement dans les régions du nord du pays. Les principaux gisements identifiés sont :

- **Hammam Bouhrara (Tlemcen)** : gisement connu situé dans l'ouest algérien, dans une zone volcanique rhyolitique.
- **Kef Chéraïa (Collo, Jijel)** : massif volcanique côtier, dont les formations rhyolitiques contiennent de la perlite.
- **Autres sites dans la wilaya de Tlemcen** : notamment Sidi Medjahed, Maghnia, Sidi Boudouma, Beider, Nedroma – zones reconnues pour leurs indices de perlite.



**Figure I.4.** Gisement Bab à Hammam Boughrara (Tlemcen) (10)

**Tableau I.6.** Les principaux gisements de la perlite en Algérie (11)

Réserves ou paramètres estimatifs (tonnes)	Conditions techniques et minières	Composition chimique (%) ou propriétés physico-mécaniques
Secteur principal : 142 500  Secteur Bab : 196 000  Secteur Roussel : 15 000	Favorables  (inexistence de roches de recouvrement)	$\text{SiO}_2 = 71,68$ ; $\text{Al}_2 \text{O}_3 = 12,69$ ; $\text{Fe}_2 \text{O}_3 = 1,34$ ; $\text{CaO} = 1,08$ ; $\text{MgO} = 0,55$ ; $\text{K}_2 \text{O} = 3,91$ ; $\text{Na}_2 \text{O} = 3,62$ ; $\text{FeO} = 0,49$ ; $\text{SO}_3 = 0,08$ ; $\text{P}_2 \text{O}_5 = 0,05$ ; $\text{PF} = 3,53$

Ces gisements sont tous liés à des contextes géologiques volcaniques d'âge tertiaire ou quaternaire. Les études pétrographiques et chimiques menées montrent une composition riche en silice amorphe, favorable à l'expansion thermique.

### ***1.3.7.1 Exploitation industrielle actuelle***

Actuellement, l'Algérie ne possède pas de production industrielle significative de perlite, bien que des gisements soient connus. Les données officielles ne rapportent pas de volumes produits de façon continue.

Toutefois, des essais industriels ont été réalisés dans certains sites. Par exemple, à Hammam Boughrara, des opérations d'extraction et d'expansion ont été entreprises par une entreprise locale. La perlite y est d'abord broyée puis chauffée à haute température dans des fours spécialisés, provoquant son expansion.

Dans le cadre de la stratégie de développement minier du pays, des projets ont été lancés pour valoriser les ressources en substances non métalliques, dont la perlite, avec pour objectif de répondre à la demande nationale en matériaux isolants et légers.

### *1.3.7.2 Usages actuels et potentiels*

Les applications de la perlite sont nombreuses et couvrent plusieurs secteurs :

- **Matériaux de construction** : utilisée comme agrégat léger pour les bétons et mortiers isolants, ou encore comme isolant thermique dans les panneaux de construction.
- **Pouzzolane naturelle** : la perlite broyée et finement moulue peut-être utilisée comme addition minérale dans les ciments et mortiers pour améliorer leurs propriétés mécaniques et thermiques.
- **Agriculture** : elle sert d'amendement de sol, en améliorant la rétention d'eau et la circulation de l'air dans les substrats.
- **Filtration** : la perlite expansée est utilisée dans les systèmes de filtration d'eau potable, de boissons ou de produits chimiques.
- **Industrie thermique** : elle est utilisée comme matériau isolant dans les équipements haute température (fours, chaudières, etc.).

### *1.3.7.3 Études et recherches locales*

Plusieurs travaux universitaires (12) ont été consacrés à la caractérisation des perlites algériennes. Des recherches ont étudié les propriétés physiques et chimiques des échantillons extraits des gisements de Tlemcen et de Jijel. Ces études ont démontré la capacité de la perlite à se comporter comme un matériau pouzzolanique, pouvant partiellement remplacer le ciment dans les mortiers tout en améliorant l'isolation thermique.

Certaines entreprises ont aussi testé son expansion industrielle, prouvant la viabilité technique de son utilisation dans le secteur du BTP.

Cette perlite est extraite sous forme de roches de diamètres variant de 20 à 50 cm, de couleur grise, à l'aspect d'un verre avec des reflets argentés, elle réfléchit la lumière suivant certains plans internes et elle se fragmente en petites sphères ou perles d'où vient son nom « perlite » (Figure I.6.a). Elle est concassée (Figure I.6.b) puis étuvée pendant 24 heures à une température de 80°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité, ensuite broyée et tamisée à

travers un tamis de 80  $\mu\text{m}$  (Figure I.6.c). Le passant sera utilisé en substitution du ciment Portland (13).



**Figure I.5** Perlite naturelle (a), concassée (b), broyée (c)(14)

#### ***1.3.7.4 Perspectives économiques***

La mise en valeur des gisements de perlite représente une réelle opportunité pour l'Algérie dans le cadre de la diversification de son économie minière. En favorisant la production locale de perlite expansée, le pays pourrait réduire ses importations de matériaux isolants, développer une filière nationale créatrice d'emplois, et répondre aux besoins croissants des secteurs du bâtiment et de l'agriculture.

### **I.4 LES SEDIMENTS DE DRAGAGE**

#### **I.4.1 Origine et définition**

Les sédiments de dragage résultent du dépôt naturel de particules (sables, limons, argiles) au fond des ports, des chenaux fluviaux et des zones côtières. L'accumulation progressive de ces matériaux sédimentaires (par érosion des versants, apports marins et ruissellements urbains/agricoles) conduit à l'envasement, ce qui impose des opérations régulières de dragage (entretien des tirants d'eau, approfondissement des bassins, travaux neufs) pour maintenir la navigabilité. Les sédiments dragués sont généralement un mélange de sables, de limons et d'argiles, avec des proportions variables selon la localisation (vases argileuses dans les ports abrités, sables vaseux en chenal, etc.).

### I.4.2 Constitution des sédiments

Les vases sont des sédiments fins généralement déposés dans des milieux aquatiques calmes, tels que les estuaires, les ports ou les lacs. Elles sont principalement constituées de **quatre éléments essentiels** :

1. **La matrice minérale** : elle comprend essentiellement du quartz, des feldspaths, et parfois des carbonates.
2. **La fraction argileuse** : composée de minéraux argileux tels que la kaolinite, l'illite ou les montmorillonites.
3. **La fraction organique** : formée de débris végétaux, de micro-organismes provenant de la décomposition de la matière organique.
4. **L'eau**, présente sous différentes formes :
  - a) **L'eau libre**, occupant les vides entre les particules solides
  - b) **L'eau liée**, absorbée sur la surface des grains minéraux
  - c) **L'eau colloïdale**, qui hydrate les colloïdes argileux
  - d) **L'eau adsorbée**, formant un film autour des particules fines.

Cette composition donne aux vases des propriétés physico-chimiques spécifiques, notamment une grande surface spécifique, une capacité d'échange cationique et une plasticité élevée. Ces caractéristiques sont potentiellement intéressantes pour une utilisation en tant qu'ajout minéral dans les bétons à hautes performances.

### I.4.3. Le dragage des sédiments

Le dragage ou curage est une opération technique consistant à extraire les sédiments accumulés dans les milieux aquatiques. Il s'agit d'une intervention essentielle pour :

- Prévenir les inondations, en maintenant la capacité hydraulique des cours d'eau ;
- Assurer le tirant d'eau nécessaire à la navigation fluviale ou maritime ;
- Assainir les zones portuaires ou urbaines, en éliminant les sédiments contaminés ou excédentaires ;
- Restaurer les milieux naturels, en favorisant une meilleure circulation de l'eau et le bon état écologique des habitats.



Figure I.6 Engin mécanique de dragage (15)

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.

1. **Les dragages en eau** : consistent en 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 à 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.

La gestion des sédiments dragués se fait selon quatre grandes filières d'élimination :

- le stockage sous eau,
- la mise en décharge,
- le stockage,

- la valorisation.

#### **I.4.4. La valorisation des sédiments de dragage**

La valorisation des sédiments de dragage s'inscrit dans une démarche de gestion durable des ressources et de réduction de l'impact environnemental. Plutôt que de les considérer comme de simples déchets à éliminer, les sédiments dragués peuvent être traités, transformés et réutilisés dans divers secteurs, notamment le génie civil, l'aménagement paysager, ou encore la fabrication de matériaux de construction.

Selon leur origine, leur granulométrie, leur teneur en matières organiques et en polluants, les sédiments peuvent être valorisés **directement** (après simple séchage ou décantation) ou **après traitement** (stabilisation, désorption, inertage). Parmi les filières de valorisation les plus courantes, on distingue :

- **La fabrication de matériaux de construction** : briques, céramiques, blocs de béton ou ciment, en mélange avec des liants hydrauliques. Les sédiments peuvent jouer un rôle de charge minérale ou même de substitut pouzzolanique selon leur composition.
- **L'aménagement de sols ou remblais** : après caractérisation géotechnique, les sédiments non pollués peuvent être utilisés pour le remblaiement de carrières, la stabilisation de berges ou la création d'ouvrages paysagers.
- **L'usage agricole** : dans certains cas et après validation sanitaire, les sédiments riches en matières organiques peuvent être utilisés comme amendement des sols.
- **La reconstitution d'habitats naturels** : en milieux côtiers ou estuariens, les sédiments fins peuvent être réutilisés pour restaurer les zones humides, les marais ou les lagunes dégradées.

Cependant, toute opération de valorisation doit respecter un cadre réglementaire strict, fondé sur l'analyse chimique, biologique et géotechnique des sédiments, afin de garantir l'absence de danger pour la santé humaine et l'environnement.

##### ***1.4.4.1 Valorisation dans le béton et mortier***

L'utilisation des sédiments de dragage dans le béton et le mortier constitue une solution innovante et durable permettant à la fois de valoriser un déchet abondant et de préserver les ressources naturelles. Les granulats naturels, notamment le sable, sont largement exploités

pour la fabrication des bétons et mortiers. Cependant, leur disponibilité devient de plus en plus limitée et leur extraction engendre des impacts environnementaux considérables. Dans ce contexte, les sédiments dragués, une fois traités, apparaissent comme une alternative viable.

Avant leur intégration, les sédiments doivent subir un traitement afin d'améliorer leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques. Ces traitements peuvent inclure le séchage, la calcination ou encore des procédés chimiques permettant de stabiliser les polluants éventuels. Plusieurs recherches (16) ont démontré qu'une substitution partielle du sable par des sédiments traités (notamment entre 20 % et 33 %) permet d'obtenir des mortiers présentant une bonne résistance à la compression, une durabilité acceptable et une porosité maîtrisée. Par exemple, une étude (17) a montré qu'un taux de substitution de 33 % permettait même une amélioration de la résistance mécanique par rapport à un mortier de référence.

Cependant, des substitutions plus élevées (jusqu'à 66 % ou 100 %) peuvent entraîner des effets négatifs tels qu'une augmentation de la porosité, une diminution de la masse volumique, un retrait plus important et même l'apparition de fissures. Ces phénomènes sont liés à la nature fine, souvent argileuse, et à la teneur en matière organique des sédiments. C'est pourquoi une étude approfondie des caractéristiques des sédiments est indispensable avant leur utilisation.

En Algérie, certaines initiatives ont été menées pour intégrer les sédiments issus du dragage des barrages dans des bétons ou mortiers. Par exemple, le barrage de Bouhanifia, qui dispose d'une capacité en eau de 73 millions de m<sup>3</sup> et ne renferme actuellement qu'une quantité de 34 millions de m<sup>3</sup>, soit environ 50 % de sa capacité réelle, vient de bénéficier d'une opération de dragage. Cette opération est assurée par une société algérienne, filiale de l'AMBT, sous la dénomination d'Hydro-Dragage. Cette entreprise devait extraire une quantité de 6 millions de m<sup>3</sup> de vase, qui sera ensuite déposée dans des bassins permettant par la suite la récupération des eaux par retour vers le barrage.

L'opération s'effectue à raison de 1 000 m<sup>3</sup>/jour, soit 250 000 m<sup>3</sup>/mois, et les travaux devraient durer 31 mois. Cette opération, entamée le lundi 10 juin 2013, a permis la création de 100 postes de travail pour une durée d'environ 36 mois. La vase retirée sera retenue sur les terres agricoles abritant les 15 bassins nécessaires à cette opération.

Les barrages de la wilaya renferment actuellement plus de 153 millions de m<sup>3</sup> d'eau, ce qui permet à la wilaya de Mascara d'être à l'abri de tout problème d'eau durant cet été. La ville de Mascara, à elle seule, consomme 18 000 m<sup>3</sup>/jour et vient de bénéficier d'un dédoublement pour 10 000 m<sup>3</sup>, soit 28 000 m<sup>3</sup> au total, ce qui permettra aux citoyens d'avoir de l'eau quotidiennement pour certains quartiers, et un jour sur deux pour d'autres (18).



**Figure I.7** Les Bassins de décantations des sédiments dragués du barrage Bouhanifia avant et après l'opération de dragage (18)

## I.5 FILLERS CALCAIRES

### I.5.1 Définition

Le filler calcaire est une poudre minérale très fine composée principalement de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), obtenue par broyage du calcaire naturel ou récupérée lors du concassage des granulats calcaires. Il est utilisé dans l'industrie du ciment et du béton comme addition minérale pour améliorer les propriétés des mortiers et bétons, notamment leur maniabilité, leur compacité et leur durabilité. Un filler est qualifié de calcaire lorsque sa teneur en carbonate de calcium est supérieure ou égale à 90 %.



**Figure I.8** Filler calcaire (25)

### I.5.2 Propriétés du filler calcaire

Le filler calcaire doit présenter une composition chimique riche en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), avec une teneur minimale de 90 %, et contenir très peu d'impuretés telles que les matières organiques ou les argiles. Sa granulométrie doit être très fine, avec une majorité des particules inférieures à  $63 \mu\text{m}$ , pour améliorer la compacité et la rhéologie des bétons et mortiers. Il doit également présenter une forme de particules régulière, avec une surface spécifique relativement élevée pour interagir efficacement avec la pâte cimentaire. Sa densité apparente se situe généralement autour de  $2,6$  à  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , et il doit être exempt d'agglomérats afin de garantir une bonne homogénéité et compatibilité avec les adjuvants chimiques utilisés dans les mélanges.

**Tableau I.7** Propriétés requises du filler calcaire pour les applications en ciment et béton (19)

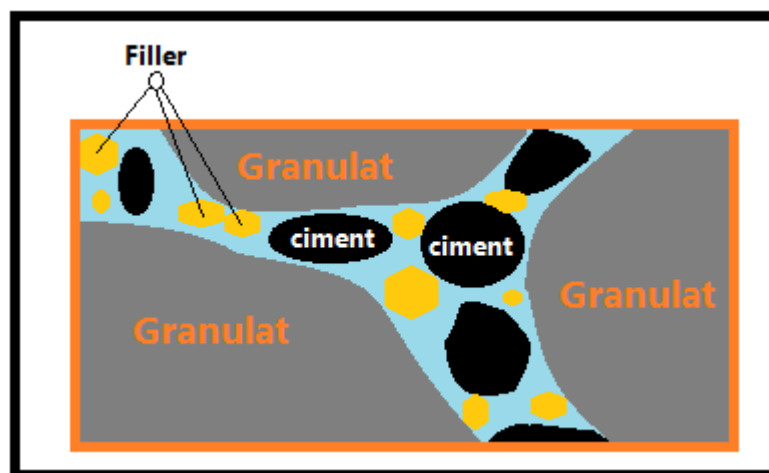
Propriété	Description
Composition chimique	Teneur en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) $\geq 90$ %, faible teneur en impuretés.
Granulométrie	Majorité des particules $< 63 \mu\text{m}$ , granulométrie stable et homogène.
Forme des particules	Particules anguleuses à subanguleuses, forme régulière.
Surface spécifique	Surface spécifique élevée ( $1$ à $6 \text{ m}^2/\text{g}$ selon la méthode BET).
Pureté minérale	Faible teneur en matières organiques et en argiles, stabilité chimique.
Densité apparente	Environ $2,6$ à $2,7 \text{ g/cm}^3$ .
Absence d'agglomérats	Produit fin et homogène, exempt de grumeaux.
Compatibilité	Bonne compatibilité avec les adjuvants chimiques et les liants hydrauliques.

### I.5.3 L'utilisation Des Fillers Calcaires

L'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du ciment et du béton a connu un essor important ces dernières années, notamment grâce à leurs propriétés intéressantes telles que la finesse, la pureté chimique et leur contribution à l'amélioration de la compacité et des performances mécaniques des bétons et mortiers. En Algérie, les fillers calcaires sont produits localement à partir des carrières de calcaire, notamment dans les régions d'Ouargla (Hassi Messaoud) et d'autres zones riches en ressources calcaires. Ces fillers, essentiellement composés de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), sont intégrés dans les formulations des bétons et mortiers pour optimiser leur rhéologie, réduire la consommation de ciment et améliorer la durabilité des ouvrages. Leur utilisation contribue ainsi à la valorisation des ressources locales et à la réduction de l'empreinte écologique de l'industrie du béton en Algérie.

### I.5.4 Le rôle des fillers calcaires

Les fillers calcaires jouent un rôle important dans les formulations de mortiers et de bétons. Leur finesse et leur composition chimique, riche en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), leur permettent de remplir les vides entre les grains de ciment et les granulats, améliorant ainsi la compacité et la densité de la matrice cimentaire. Cette action de remplissage réduit la porosité, augmente la cohésion et améliore la maniabilité des mélanges. Les fillers calcaires participent aussi à la réduction de la chaleur d'hydratation et à la diminution des risques de fissuration précoce. En outre, ils permettent de réduire la consommation de ciment, contribuant ainsi à une production de béton plus économique et plus respectueuse de l'environnement.



**Figure I.9** Illustration de l'effet filler

### **I.5.5 Influence des fillers calcaires sur les propriétés des mortiers**

L'introduction de fillers calcaires dans la composition des mortiers a une influence significative sur leurs propriétés à l'état frais comme à l'état durci. À l'état frais, les fillers améliorent la rhéologie du mortier grâce à leur finesse et leur pouvoir lubrifiant. Ils permettent d'obtenir une pâte plus homogène, plus fluide, et donc plus facile à mettre en œuvre, sans augmenter la teneur en eau. Cette amélioration est liée à l'effet de remplissage des particules fines qui comblent les vides entre les grains de ciment et de sable.

Sur le plan mécanique, les fillers calcaires contribuent à augmenter la compacité du mortier, ce qui peut améliorer sa résistance à la compression à court terme, en particulier si le dosage en eau est bien maîtrisé. Toutefois, leur effet peut être neutre ou légèrement négatif à long terme si leur substitution au ciment est trop importante, car ils sont considérés comme quasi-inertes et ne participent que peu à l'hydratation.

Par ailleurs, les fillers calcaires influencent la durabilité du mortier. En réduisant la porosité capillaire, ils peuvent limiter la pénétration des agents agressifs (comme les chlorures ou les sulfates), à condition d'être correctement dosés. Ils améliorent également l'adhérence entre la pâte et les granulats fins, ce qui se traduit par une microstructure plus dense et plus stable.

Enfin, du point de vue environnemental et économique, l'utilisation de fillers calcaires permet de réduire la consommation de ciment, ce qui diminue les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la fabrication du béton tout en abaissant les coûts de production.

### **I.5.6 Fillers calcaires et durabilité**

Les fillers calcaires contribuent de manière notable à la **durabilité** des mortiers et bétons lorsqu'ils sont utilisés à des dosages appropriés. Grâce à leur finesse et leur pouvoir de remplissage, ils comblent les vides dans la matrice cimentaire, réduisant ainsi la porosité et la perméabilité du matériau durci. Cette compacité accrue limite la pénétration des agents agressifs comme les ions chlorures, les sulfates ou le dioxyde de carbone, qui sont responsables de la dégradation des ouvrages en béton. De plus, les fillers calcaires stabilisent la microstructure en renforçant la zone de transition interfaciale entre la pâte et les granulats, ce qui améliore la résistance aux cycles gel/dégel et aux attaques chimiques. En favorisant une meilleure durabilité, l'incorporation de fillers calcaires permet donc d'accroître la longévité des ouvrages en béton tout en réduisant leur empreinte environnementale.

**I.6 CONCLUSION**

Ce chapitre a présenté les différents types d'additions minérales, comme la perlite, les sédiments de dragage et les fillers calcaires. Chacune de ces additions apporte des avantages spécifiques pour les mortiers et bétons : la perlite améliore l'isolation et la légèreté, les sédiments de dragage constituent une ressource locale intéressante, et les fillers calcaires augmentent la compacité et la durabilité. Leur intégration dans les formulations de béton ouvre la voie à des matériaux plus durables, économes en ressources et adaptés au contexte local algérien.

## CHAPITRE II : LA DURABILITE

### II.1. INTRODUCTION

La durabilité des matériaux cimentaires, notamment du béton, constitue aujourd'hui un enjeu central dans le domaine de la construction. Elle se définit comme la capacité d'un matériau à remplir ses fonctions dans le temps, en conservant ses propriétés mécaniques, physiques et esthétiques, malgré l'influence de son environnement.

Les structures en béton sont souvent exposées à des milieux agressifs : atmosphères urbaines polluées, environnements marins, cycles de gel-dégel, sols acides ou encore agents chimiques industriels. Ces agressions peuvent altérer la microstructure du béton, provoquer la corrosion des armatures, ou réduire la résistance mécanique et la durabilité de l'ouvrage.

Plus qu'une simple propriété, la durabilité est aujourd'hui une exigence fondamentale dans la conception des ouvrages modernes. Elle vise à prolonger la durée de vie des structures, à réduire les coûts d'entretien et à préserver les ressources naturelles en limitant les démolitions et reconstructions précoces.

Dans cette optique, il devient indispensable de comprendre les mécanismes de dégradation du béton et les facteurs qui influencent sa durabilité. Ce chapitre s'intéressera en particulier aux deux principales formes d'agressions chimiques :

**Les attaques acides**, souvent rencontrées dans les stations d'épuration, les milieux industriels ou les sols pollués.

**La carbonatation**, un phénomène plus lent mais tout aussi néfaste, qui affecte la capacité du béton à protéger les armatures contre la corrosion.

L'étude de ces phénomènes permet de mieux adapter les formulations de béton, de sélectionner les additions minérales adéquates, et de proposer des solutions durables pour les ouvrages exposés à des environnements agressifs.

## II.2. LES ATTAQUES ACIDES

Les matériaux cimentaires sont des matériaux basiques par excellence et sont très sensible aux milieux acides avec lesquels il réagissent suivant la réaction bien connue :



Les attaques acides se font principalement suivant un mécanisme de dissolution. Suivant le cas, le phénomène de dissolution peut être accompagné de la précipitation du sel formé lors de la réaction base + acide si le sel est peu soluble. Ce sel peut avoir un effet colmatant et ralentir les réactions de dissolution. Le produit final de dégradation par un acide peut-être un gel de silice résultant de la décalcification totale des C-S-H qui, selon Grube et Rechenberg (39), peut avoir un rôle protecteur à la surface du béton et ralentir les réactions. Ces auteurs insistent également sur le fait que les conditions de transport de l'agent agressif sont plus importantes que sa concentration.

### II.2.1 Les différentes sources d'environnement acide

Les sources de milieux acides agressifs sont très vastes (40). Ceux-ci proviennent d'habitude de processus industriels, mais peuvent même être la conséquence de l'activité urbaine. La source des environnements acides peut même représenter les pollutions atmosphériques par le dioxyde de carbone gazeux, le dioxyde de soufre et des oxydes d'azote. Les milieux acides les plus fréquents sont :

#### II.2.1.1 Les pluies acides

Les pluies dites « propres » ont généralement un pH compris entre 5,6 et 7. Elles n'ont pas d'effets nocifs sur le béton réalisé suivant les règles de l'art. Par contre, les pluies dites « acides », dont le pH peut descendre jusqu'à 4 et parfois moins, sont agressives. L'occurrence de ce type de pluies est en relation principalement avec la pollution par les oxydes de soufre SO<sub>x</sub> d'origine industrielle ou domestique (combustion des charbons, fiouls, carburants) qui représentent environ un tiers de tous les oxydes de soufre de l'atmosphère. Le résultat est la formation d'acide sulfurique très hygroscopique qui se condense rapidement en gouttelettes susceptibles de contenir des métaux lourds (mercure, plomb, argent, cadmium) et des sulfates (d'ammonium, de sodium). Les oxydes d'azote NO<sub>x</sub> également présents se transforment en acide nitrique. La composition et le pH des pluies peuvent varier en fonction de la saison et des conditions locales.

### ***II.2.1.2. Les acides minéraux***

Les acides chlorhydrique et nitrique, acides minéraux forts qui par réaction avec la chaux du ciment donnent naissance respectivement, au chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2$  et au nitrate de calcium  $(\text{NO}_3)_2 \text{Ca}$ , sels très solubles, sont très agressifs vis-à-vis des ciments Portland (41) (42). L'acide sulfurique  $\text{H}_2 \text{SO}_4$ , formé, par exemple, lors de l'oxydation de l'hydrogène sulfuré produit dans les réseaux d'assainissement ou par condensation à partir du  $\text{SO}_2$  atmosphérique, est doublement agressif par son acidité et par l'anion  $\text{SO}_4^{2-}$  qui peut conduire à la formation de sels expansifs tels que le gypse et l'ettringite. L'acide phosphorique  $\text{H}_3 \text{PO}_4$ , qui entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif, mais provoque une désintégration lente du béton.

### ***II.2.1.3. Les acides organiques***

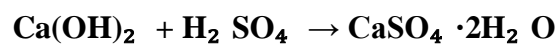
On les rencontre fréquemment dans les effluents rejetés par les industries chimiques (fabriques d'engrais, papeteries, teintureries, tanneries...) et agroalimentaires (vinaigrieres, laiteries, fromageries, distilleries, conserveries, élevages...etc.). Ils sont généralement moins agressifs que les acides minéraux. Les acides organiques tels que les acides acétique, lactique, butyrique, formique, contenus dans certaines eaux usées, attaquent les constituants calciques du ciment. Ces acides faibles, peu dissociés, sont généralement modérément agressifs et provoquent des dégradations lentes. Les déjections animales (purins, fumiers) contiennent également les acides acétique, propionique, butyrique, iso-butyrique. Dans les tourbières et les marécages, les acides humiques sont susceptibles d'atteindre des concentrations élevées. Ils peuvent échanger leurs ions  $\text{H}^+$  avec des cations de sels neutres, formant ainsi des acides dont le pH peut s'abaisser jusqu'à 4.

## **II.2.2 Mécanisme d'attaque acide des matrices cimentaires**

Lorsqu'un béton est exposé à un environnement acide, il subit un phénomène de lixiviation, c'est-à-dire une dissolution progressive de ses constituants sous l'effet d'un fluide agressif. Parmi les hydrates de la pâte de ciment, la portlandite (hydroxyde de calcium) est la plus sensible à cette attaque en raison de sa forte solubilité à température ambiante. Elle est donc la première à être dissoute.

Une fois la portlandite consommée, les autres phases hydratées telles que les aluminates de calcium, le monosulfoaluminate hydraté, l'ettringite ainsi que les silicates de calcium hydratés (C-S-H) subissent à leur tour une dégradation progressive. Cela conduit à l'apparition de zones successives présentant une minéralogie différente, marquées par des fronts de dissolution.

L'action des acides repose sur leur réaction avec les composés basiques de la pâte, notamment le  $\text{Ca(OH)}_2$ . Cette interaction donne lieu à la formation de sels de calcium, très solubles dans l'eau. Par exemple, en présence d'acide sulfurique, la réaction suivante se produit :



Cette réaction illustre à la fois la consommation de la chaux et la formation de gypse, un produit secondaire pouvant également participer à des désordres dans le matériau.

### II.2.3 Influence des additions minérales sur la résistance des mortiers aux attaques acides

Une étude expérimentale (20) a été menée sur la durabilité de mortiers à base de perlite naturelle exposés à des environnements acides. Les mortiers ont été soumis à une immersion dans des solutions à 2 % d'acide sulfurique ( $\text{H}_2 \text{SO}_4$ ) et d'acide chlorhydrique (HCl) pendant 63 jours.

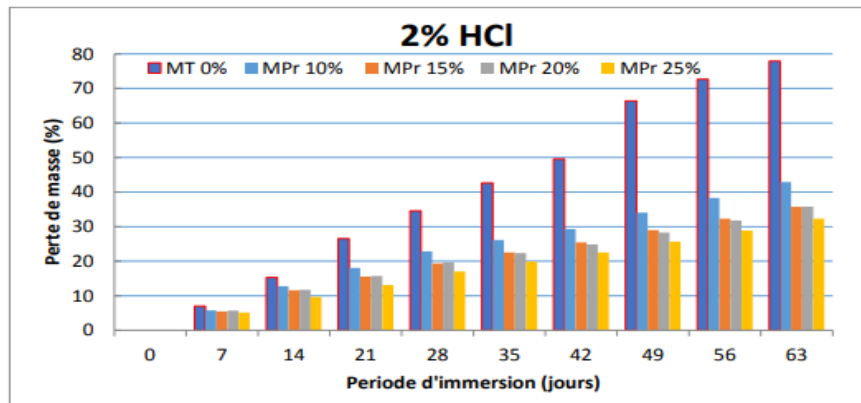
Les compositions des mortiers étudiés sont présentées dans le tableau I.8

**Tableau I.8** Les compositions des mortiers (20)

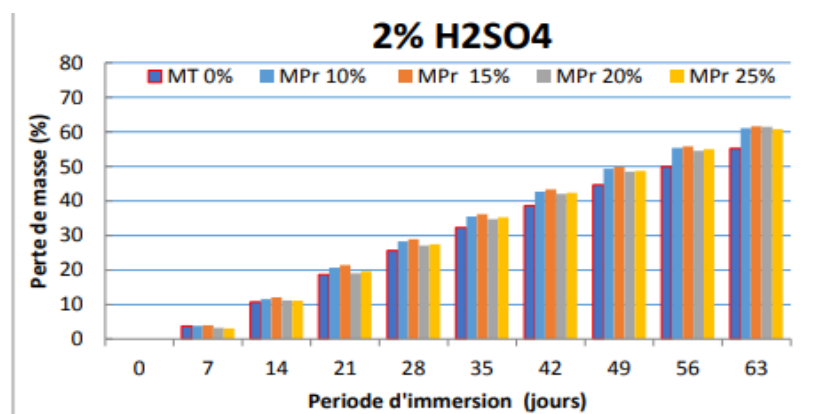
Code	Désignation	Pourcentage de perlite (%)
MT	Mortier témoin (sans perlite)	0 %
MPr10	Mortier avec perlite	10 %
MPr15	Mortier avec perlite	15 %
MPr20	Mortier avec perlite	20 %
MPr25	Mortier avec perlite	25 %

Les résultats (Figure I.10 et Figure I.11) ont montré que la perlite n'apporte qu'un léger effet protecteur en milieu sulfurique. En revanche, face à l'acide chlorhydrique, l'ajout de perlite a permis de réduire de manière significative la perte de masse des mortiers. À 25 % de substitution, la réduction atteint environ 40 % par rapport au mortier témoin. Cette étude (18)

met ainsi en évidence le potentiel de la perlite comme addition minérale favorable à la durabilité des matériaux cimentaires, en particulier en milieu acide chlorhydrique.



**Figure I.10** Evolution de la perte de masse des mortiers à base de perlite en fonction de la période d'immersion dans la solution d'HCl (20)



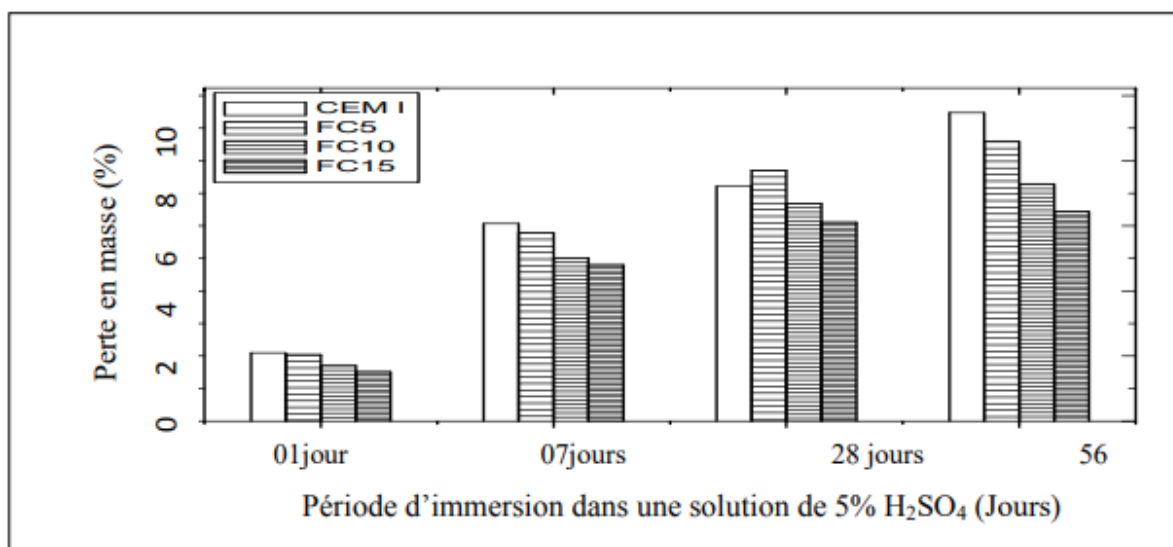
**Figure I.11** Evolution de la perte de masse des mortiers à base de perlite en fonction de la période d'immersion dans la solution d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (20)

Une évaluation de l'influence de l'incorporation de fillers calcaires à différents taux (5 %, 10 % et 15 %) sur la durabilité des mortiers exposés à une solution d'acide sulfurique à 5 % a été effectuée sur des compositions des mortiers (21) regroupées dans le Tableau 1.9.

**Tableau I.9** Les compositions des mortiers (21)

Type de mortier	Ciment (%)	Filler calcaire (%)	E/C (rapport eau/ciment)
CEM I	100	0	0,5
FC5	95	5	0,5
FC10	90	10	0,5
FC15	85	15	0,5

Les résultats obtenus (Figure I.12) ont mis en évidence une évolution significative des pertes en masse des mortiers au cours des périodes d'immersion (1, 7, 28 et 56 jours). Les mortiers contenant des fillers calcaires présentent globalement une meilleure résistance à l'attaque acide, caractérisée par des pertes en masse plus faibles par rapport au mortier témoin. Cette amélioration de la durabilité semble proportionnelle à la teneur en fillers calcaires, bien que l'effet protecteur tende à se stabiliser au-delà de 10 % d'incorporation.



**Figure I.12** Evolution de la perte du poids des mortiers aux fines calcaires en fonction de la période d'immersion en 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (21)

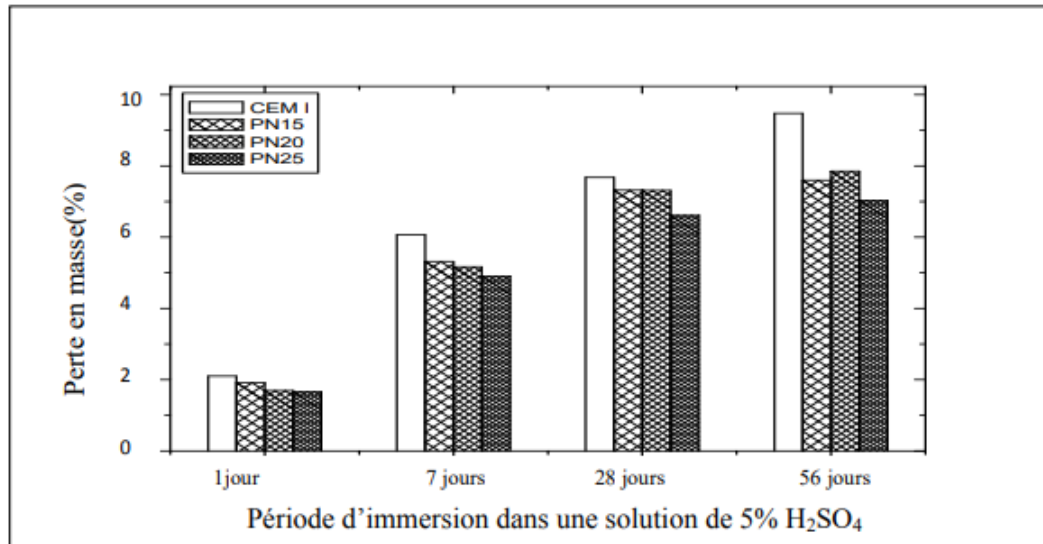
Senhadji . et al. (22) ont mis en évidence, à travers des essais mécaniques, chimiques et calorimétriques réalisés sur des mortiers (Tableau I.10), que l'incorporation de 15 à 25 % de pouzzolane naturelle de Béni-Saf permet de réduire de manière significative la chaleur d'hydratation du ciment. Cette diminution contribue à limiter le retrait de la pâte, tout en améliorant la durabilité des matériaux. (Figure I.13)

**Tableau I.10** Les compositions des mortiers(21)

Mortiers	Pouzzolane naturelle (%)
MT	0 %
MPZ15	15 %
MPZ20	20 %
MPZ25	25 %

Les résultats (Figure I.13) montrent que l'incorporation de pouzzolane naturelle de Béni Saf dans les mortiers améliore leur résistance à l'attaque acide (H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> à 5 %). Le mortier

témoin (CEM I) présente la plus forte perte de masse, atteignant près de 9,5 % après 56 jours. En revanche, les mortiers contenant 15 à 25 % de pouzzolane (PN15, PN20, PN25) subissent des pertes moindres, avec la meilleure performance pour PN25, qui ne dépasse pas 7 % à 56 jours. Cela confirme l'effet bénéfique de la pouzzolane sur la durabilité en milieu acide.



**Figure I.13** Evolution de la perte du poids des mortiers à la pouzzolane de Béni- Saf en fonction de la période d'immersion en 5%  $H_2SO_4$  (21)

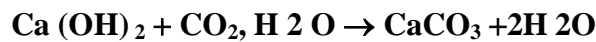
## II.3. LA CARBONATATION

### I.3.1. Les mécanismes de carbonatation

La carbonatation atmosphérique repose sur l'action du gaz carbonique  $CO_2$  de l'atmosphère qui se diffuse à travers le réseau poreux ou fissural du béton et se dissout en acide au contact de la solution interstitielle. Cette acidification du milieu induit une dissolution de la portlandite qui constitue la réserve de basicité du béton. Au contact de la solution interstitielle, le gaz carbonique  $CO_2$  provoque une réaction chimique avec la pâte de ciment hydratée. Cette réaction transforme les produits d'hydratation, comme la portlandite  $Ca(OH)_2$  et les CSH, en carbonates de calcium  $CaCO_3$ .

La carbonatation entraîne une baisse du pH (initialement entre 12,5 et 13,5) dans la solution interstitielle du béton jusqu'aux environs de 9. La solution interstitielle perd sa capacité protectrice envers les armatures subissant alors une initiation de la corrosion (Figure I.10).

Dans le cadre d'une approche simplifiée, le mécanisme réactionnel de carbonatation de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  est synthétisé par la réaction chimique hétérogène suivante :



Cette équation indique que la carbonatation de la portlandite s'accompagne globalement d'une libération de l'eau de structure. Les grandeurs qui peuvent permettre de caractériser l'évolution de la réaction, en fonction du temps ou de la profondeur de pénétration, sont la concentration en portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et le pH de la solution interstitielle du béton. La figure I.10 illustre l'intervention combinée des trois phases gazeuse, aqueuse et solide, au cours du processus de carbonatation de la portlandite. La carbonatation est donc maximale lorsque l'humidité relative à une valeur modérée, c'est-à-dire lorsqu'elle est comprise entre 40 et 60 %, ou entre 40 et 80 %, voire entre 84 et 92 % (23). Ce domaine correspond en moyenne à quelques couches de molécules d'eau adsorbées sur la surface du solide. La carbonatation ne se produit donc pas dans un béton totalement sec ou complètement saturé en eau.

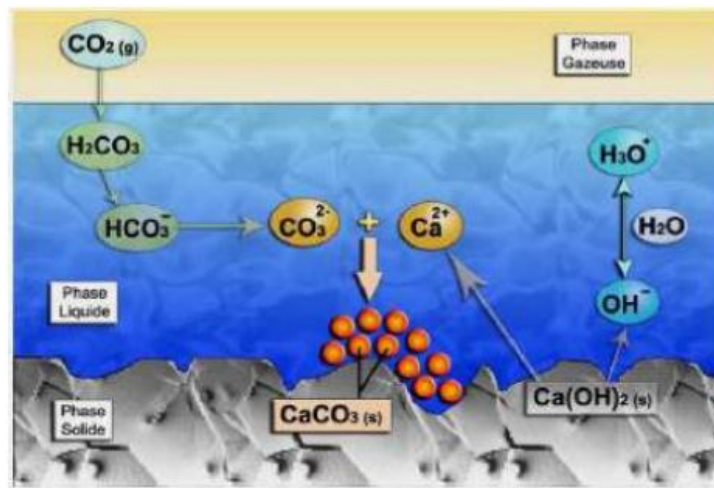


Figure I.14 Mécanisme de carbonatation de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (22)

### I.3.2. Effets des additions minérales sur la carbonatation des mortiers

Des essais de carbonatation naturelle ont été réalisés sur des mortiers pouzzolaniques élaborés avec de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (23) (Tableau I.11). Cette recherche visait à évaluer la durabilité des mortiers vis-à-vis des environnements agressifs, notamment riches en dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), et à caractériser leur comportement face à la carbonatation.

L'essai a été réalisé selon le protocole AFPC-AFREM, en exposant des échantillons prismatiques (40x40x160 mm) à une atmosphère contenant 50 % de CO<sub>2</sub> à une humidité relative de 65 % et une température contrôlée. L'évolution de la **profondeur de carbonatation** a été suivie à 7, 14, 28 et 56 jours à l'aide de phénolphtaléine comme indicateur de pH.

**Tableau I.11** Les compositions des mortiers (23)

<b>Mortiers</b>	<b>Pouzzolane naturelle (%)</b>
CEM I	0 %
PZ10	10 %
PZ15	15 %
PZ20	20 %
PZ25	25 %
PZ30	30 %

Les résultats montrent une **augmentation de la profondeur carbonatée** avec le taux de substitution de la pouzzolane. À 28 jours :

Pour les mortiers à base de ciment **CEM I**, l'augmentation de la carbonatation allait de **+20 % à +40 %** pour des taux de pouzzolane de 10 à 30 %.

Pour les mortiers à base de ciment **CEM II**, cette augmentation était encore plus marquée, atteignant **+47 %**.

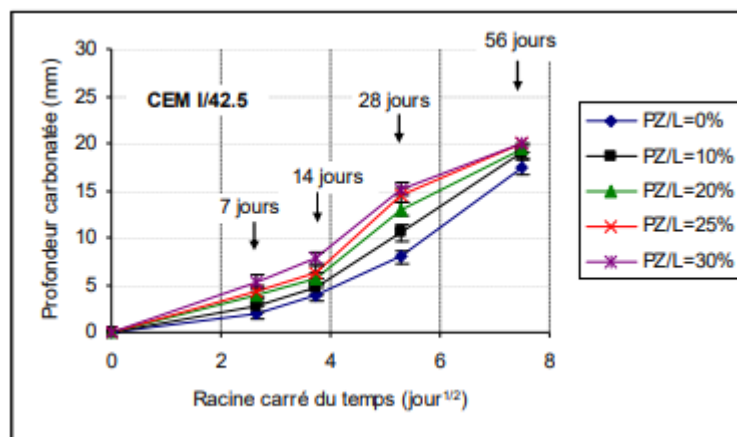
À 56 jours, les mortiers à base de **CEM I** étaient totalement carbonatés, tandis que ceux à base de **CEM II** ne l'étaient totalement que pour les compositions contenant 25 % ou 30 % de pouzzolane.

La **vitesse de carbonatation** a également été réduite avec l'incorporation de pouzzolane. Par exemple, pour le mortier avec 30 % de pouzzolane :

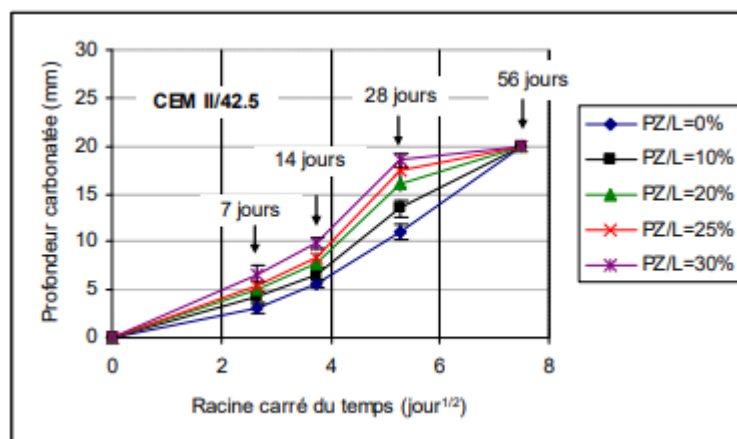
La vitesse a été réduite à **0,89 mm/ $\sqrt{j}$**  (CEM I) contre **2,58 mm/ $\sqrt{j}$**  pour le mortier de référence.

Pour CEM II, elle est passée de **3,44 mm/ $\sqrt{j}$**  à **0,94 mm/ $\sqrt{j}$** .

Ces performances s'expliquent par la réduction de la teneur en portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) dans les mélanges pouzzolaniques, due à la réaction pouzzolanique, ce qui facilite la pénétration du  $\text{CO}_2$  et donc la carbonatation. Ainsi, malgré une vitesse de propagation plus faible, la quantité de  $\text{CO}_2$  nécessaire à la carbonatation complète est moindre, ce qui conduit à des profondeurs finales plus importantes. Les deux figures (I.15 et I.16) illustrent les évolutions des profondeurs carbonatées des mortiers avec ou sans l'utilisation de la pouzzolane pour les deux types de ciment CEM I et CEM II.



**Figure I.15** Profondeur de carbonatation (projection de phénolphtaléine) en fonction de la racine du temps (CEM I/42.5) : mode A.F.P.C.-A.F.R.E.M.(23)



**Figure I.16** Profondeur de carbonatation (projection de phénolphtaléine) en fonction de la racine du temps (CEM II/42.5) mode A.F.P.C.-A.F.R.E.M (23)

Les résultats ont montré que les mortiers à base de CEM III/C présentent une profondeur de carbonatation plus importante sous atmosphère enrichie en  $\text{CO}_2$ , et que la carbonatation à 20 % de  $\text{CO}_2$  réduit significativement la résistance à la compression et à la flexion, en raison du retrait accru et de la dégradation des phases hydratées. Cette étude souligne l'importance

de bien doser les additions dans les formulations ternaires afin de maîtriser la carbonatation et préserver la durabilité à long terme des mortiers.

Une étude a été menée par Élodie (24) dans le cadre du congrès CFGC – Prix René Houpert, visant à évaluer la durabilité des matériaux cimentaires à base d'un ciment CEM III/C contenant une très forte teneur en laitier de haut fourneau (85 %), en remplacement partiel du clinker. Ce ciment, reconnu pour son impact environnemental réduit, a été étudié en profondeur afin de comprendre son comportement face à la carbonatation, notamment sous chargement mécanique. L'étude s'est intéressée à la carbonatation naturelle (0,03 %, 2 % et 20 % de CO<sub>2</sub>) de mortiers de dimension standard (4×4×16 cm<sup>3</sup> et 7×2×28 cm<sup>3</sup>) soumis à un régime de cure normé (EN 196-1), avec un rapport E/C de 0,5. L'effet de la charge en flexion 4 points, combiné à la carbonatation, a été également étudié pour simuler des conditions de sollicitation réelle.

**Tableau I.12** Les compositions des mortiers (24)

<b>Constituants principaux</b>	<b>Pourcentage</b>
Laitier de haut fourneau	85 %
Ciment Portland (CEM I)	15 %
Rapport E/C	0,5

**Principaux résultats :**

- Carbonatation accrue avec l'augmentation du taux de CO<sub>2</sub>, accompagnée d'une élévation de la teneur en carbonates de calcium (CaCO<sub>3</sub>).
- Retrait dimensionnel fortement amplifié en milieu riche en CO<sub>2</sub> : environ 4 fois plus important à 20 % CO<sub>2</sub> qu'en condition naturelle.
- Diminution progressive de la résistance à la compression avec l'intensité de la carbonatation : de 47,7 MPa (référence) à 33,0 MPa après exposition à 20 % CO<sub>2</sub>.
- Sous chargement en flexion, la carbonatation n'a pas significativement augmenté en profondeur, mais une perte notable de résistance à la flexion a été observée.

#### **II.4. CONCLUSION**

En conclusion de ce chapitre, il ressort que la durabilité des mortiers exposés aux environnements agressifs, notamment les attaques acides et la carbonatation, dépend largement de la nature et du dosage des additions minérales utilisées. Les ajouts pouzzolaniques tels que la fumée de silice, la perlite broyée ou la pouzzolane naturelle peuvent améliorer la résistance des mortiers aux milieux acides en réduisant la porosité et la teneur en portlandite. Cependant, ces mêmes ajouts, en abaissant le pouvoir tampon du matériau, peuvent accélérer la carbonatation en facilitant la pénétration du  $\text{CO}_2$ . Il est donc essentiel d'adapter la formulation des mortiers selon les contraintes d'exposition, afin de garantir leur durabilité à long terme.

# **PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE**

## PROBLEMATIQUE

La valorisation des sédiments issus du dragage des barrages tels que le barrage de Chorfa, offre de nouvelles perspectives de recherche dans divers domaines tels que les matériaux de construction et les travaux publics. Au lieu d'être considérés comme des déchets à éliminer, les sédiments peuvent être revalorisés comme des matières premières alternatives, notamment dans le secteur du génie civil.

Des études récentes ont démontré que les sédiments de dragage, après un traitement thermique adéquat (calcination), se transforment en vase calcinée pouvant être utilisée en substitution partielle au ciment dans les mortiers. Cela présente un intérêt environnemental majeur en réduisant l'empreinte carbone liée à la production du ciment, tout en limitant l'accumulation des vases dans les barrages. En parallèle, l'utilisation d'additions minérales naturelles comme la perlite ou les fillers calcaires contribue à améliorer la performance technique des matériaux cimentaires.

L'incorporation d'additions minérales telles que la vase calcinée, la perlite et les fillers calcaires est devenue une technique essentielle pour améliorer certaines propriétés du mortier, notamment la durabilité. Il est donc nécessaire d'évaluer leur impact sur le comportement des mortiers ternaires et quaternaires face à des environnements agressifs. Les études sur ce type de mortiers restent rares surtout pour les mortiers quaternaires.

Notre étude porte sur la durabilité des mortiers intégrant la vase calcinée issue des sédiments de dragage du barrage de Chorfa II, la perlite et les fillers calcaires. Ces formulations ont été élaborées dans le cadre des travaux expérimentaux menés par Achour (25). Nous analyserons en détail l'influence de ces additions sur la résistance des mortiers vis-à-vis des agressions environnementales, à travers des essais de carbonatation et l'attaque de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ).

**PARTIE II :**  
**MATERIAUX, METHODES**  
**EXPERIMENTALES ET RESULTATS**

## CHAPITRE I : MATERIAUX

### I.1. INTRODUCTION

Dans le cadre de ses travaux de recherche, Achour (25) s'est intéressé à l'optimisation et à la caractérisation de la réaction pouzzolanique dans des mortiers où une partie du ciment est substituée par des matériaux alternatifs. Son étude a porté plus précisément sur l'utilisation combinée de sédiments de dragage calcinés, de perlite naturelle et de filler calcaire, en vue d'élaborer des matrices cimentaires performantes et durables.

Les matériaux utilisés dans cette recherche proviennent de gisements locaux : les sédiments ont été extraits du barrage de Chorfa (Mascara), la perlite naturelle provient de Hammam Boughrara à Meghnia (Tlemcen), et le filler calcaire est issu du Djebel Antar à Mécheria. Ces ressources ont été étudiées en tant que pouzzolanes potentielles, qu'elles soient naturelles (perlite) ou artificielles (sédiments calcinés).

Achour (25) a formulé plusieurs compositions de mortiers en remplaçant partiellement le ciment par ces matériaux, avec des taux de substitution de 15 % pour les sédiments de dragage, et de 5 %, 15 % et 25 % pour la perlite et le filler calcaire. Les performances mécaniques de ces mortiers ont été évaluées à différentes échéances, allant de 2 à 180 jours.

Dans le prolongement de ce travail, nous souhaitons réaliser une nouvelle série d'essais portant sur l'attaque chimique de ces mêmes mortiers. L'objectif est d'évaluer leur durabilité dans des environnements agressifs (acide sulfurique et  $\text{CO}_2$ ), afin de mieux comprendre leur comportement envers les attaques acides et la carbonation et de valider leur potentiel dans des conditions d'exposition plus sévères.

### I.2 CIMENT

Pour cette recherche (25), le ciment Portland CEMI 42,5, produit par la cimenterie de Saida située dans l'ouest de l'Algérie, a été utilisé. Sa surface spécifique Blaine est évaluée à 3685  $\text{cm}^2/\text{g}$  selon la norme (EN 196- 6). Les détails sur sa composition chimique et ses propriétés physiques sont présentés dans les tableaux II.1 et II.2.

**Tableau II.1** Compositions chimiques du ciment CEM I 42,5 analysées par XRF (% en poids) (25)

Oxydes	CEM I 42,5 (% en poids)
SiO <sub>2</sub>	19,72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,18
CaO	63,06
MgO	1,08
SO <sub>3</sub>	2,32
K <sub>2</sub> O	0,98
Na <sub>2</sub> O	0,05
Cl <sup>-</sup>	/
PF (Perte au feu)	3,80
CaCO <sub>3</sub>	/

**Tableau II.2** Caractérisation physique du ciment (23)

Paramètres	Valeurs (Ciment)
Densité absolue (g/cm <sup>3</sup> )	3,13
Finesse Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3685

Sa composition minéralogique illustrée dans le tableau II.3, est obtenue en utilisant la formule de Bogue appliquée au clinker ordinaire.

**Tableau II.3** Composition minéralogique du clinker. (25)

Constituants	Teneur massique (%)
C <sub>3</sub> S	56,71
C <sub>2</sub> S	12,24
C <sub>3</sub> A	7,37
C <sub>4</sub> AF	8,86

### I.3. LES SÉDIMENTS DE DRAGAGE

Dans ses travaux expérimentaux, Achour (25) a utilisé des sédiments de dragage issus du barrage de Chorfa II, situé dans la wilaya de Mascara, comme substitut partiel au ciment dans les formulations de mortier. Ces sédiments ont été prélevés dans la zone de rejet en aval du barrage, puis soumis à un processus rigoureux de séchage, concassage, broyage, tamisage et enfin calcination à une température de 750 °C, selon le protocole décrit par Semcha (26).

Des analyses physico-chimiques et minéralogiques ont été réalisées sur ces échantillons traités thermiquement. Les résultats ont révélé que la calcination transforme la fraction argileuse kaolinique des sédiments en une structure amorphe, favorable à la réactivité pouzzolanique. Ce phénomène est lié à la déshydroxylation et à la destruction de la structure cristalline du kaolin entre 600 et 900 °C, ce qui mène à la formation de métakaolinite, un matériau reconnu pour son activité pouzzolanique. Ces conclusions s'appuient sur les travaux de Belaribi (27), Belguesmia (28), Taieb (29) et Hadj Sadok (30).

Le procédé utilisé par Achour (25) pour l'activation thermique des sédiments vise à évaluer leurs performances en tant qu'ajout cimentaire, en examinant leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques. Cette méthode a déjà été appliquée dans plusieurs études portant sur la valorisation des sédiments de dragage. Le schéma global de ce processus est présenté dans la figure II.1.



**Figure II.1** Les étapes de traitement des sédiments de dragage (25).

**1 Séchage** : L'échantillon de vase est d'abord placé dans une étuve à 105 °C pour éliminer l'humidité, ce qui facilite ensuite son broyage et son tamisage.

**2 Concassage** : Après séchage, la vase est concassée afin de rendre le broyage plus aisé.

**3 Broyage** : La vase concassée est ensuite finement broyée.

**4 Tamisage** : La vase broyée est passée à travers un tamis de 80  $\mu\text{m}$  en voie sèche, et seuls les éléments qui traversent le tamis sont conservés pour les étapes suivantes.

**5 Calcination** : Ce traitement thermique est appliqué à la vase préparée, qui est cuite à une température de 750 °C (25), comme l'illustre la figure II.2.



**Figure II.2** Four de calcination utilisé (+ 1200°C) (25)

La composition chimique des sédiments, est donnée dans le Tableau II.4

**Tableau II.4** Compositions chimiques des sédiments bruts et calcinés, en utilisant la fluorescence des rayons X (XRF) (% en poids) (25)

Composition des oxydes	Sédiments bruts (%)	Sédiments calcinés (%)
SiO <sub>2</sub>	40,04	48,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,58	11,78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,40	4,48
CaO	20,11	21,36
MgO	1,93	2,45
SO <sub>3</sub>	0,30	0,40
K <sub>2</sub> O	0,92	1,32
Na <sub>2</sub> O	0,25	0,69
Cl	0,06	0,08
PF (Perte au Feu)	23,08	3,80
CaCO <sub>3</sub>	/	/

### I.3.1 Caractéristiques physiques des sédiments

La vase étudiée (25) a été soumise à une analyse physicochimique afin d'en déterminer les propriétés essentielles influençant son comportement dans les formulations cimentaires telles que les masses volumiques (apparente et absolue) tableau II.5

**Tableau II.5** Masses volumiques des sédiments du barrage de Chorfa II (25)

Paramètre	Sédiments bruts	Sédiments calcinés
Densité absolue	2,44	2,62
Densité apparente	0,51	0,49

#### I.4 LA PERLITE NATURELLE

La perlite naturelle employée dans l'étude de Achour (25) est extraite du gisement de Hammam Boughrara, situé à Maghnia, dans le nord-ouest de l'Algérie. Ce matériau, initialement sous forme de roche, a été concassé, puis séché à 105 °C pendant 24 heures dans une étuve afin d'éliminer l'eau libre. La roche séchée a ensuite été broyée finement pour obtenir une poudre, comme illustré par la Figure II.3



**Figure II.3** (a) Roche de perlite naturelle avant broyage ; (b) Poudre obtenue après broyage)  
(25)

La composition chimique élémentaire de la perlite naturelle est présentée dans le Tableau **II.6**

**Tableau II.6** Composition chimique de la perlite naturelle (25)

Oxydes	Perlite naturelle (%)
SiO <sub>2</sub>	72,29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,44
CaO	2,24
MgO	0,53
SO <sub>3</sub>	0,02
K <sub>2</sub> O	2,74
Na <sub>2</sub> O	/
Cl <sup>-</sup>	0,26
PF	/
CaCO <sub>3</sub>	1,26

La densité absolue de la perlite naturelle est de 2,41 g/cm<sup>3</sup>. Sa finesse, exprimée par la surface spécifique Blaine selon la norme NF EN 196-6 (1990), est de 4189 cm<sup>2</sup>/g (25).

### I.5 LES FILLERS CALCAIRES

Les fillers calcaires utilisés proviennent de la carrière de Djebel Antar, située à Mécheria, dans le sud-ouest de l'Algérie. Ils se présentent initialement sous forme de poudre fine (figure II.4)

**Figure II.4** Photo des fillers calcaires (25)

La composition chimique élémentaire des fillers calcaires est donnée dans le Tableau II.7

**Tableau II.7** Composition chimique des fillers calcaires (en % masse) (25)

Oxydes	Fillers calcaires (%)
SiO <sub>2</sub>	3,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,64
CaO	44,82
MgO	6,51
SO <sub>3</sub>	0,03
K <sub>2</sub> O	0,27
Na <sub>2</sub> O	/
Cl <sup>-</sup>	0,01
PF	/
CaCO <sub>3</sub>	108,37

La masse volumique absolue des fillers calcaires a été évaluée à 2,52 g/cm<sup>3</sup>, la surface spécifique Blaine est de 2994 cm<sup>2</sup>/g (25)

### I.6 SABLE NORMALISE

Les mortiers sont confectionnés à l'aide d'un sable normalisé siliceux (SABBIA NORMAL STANDARD SAND) (25). Il présente une masse volumique de 2600 kg/m<sup>3</sup>

### I.7 ADJUVANT

L'adjuvant utilisé (25) dans la fabrication des mortiers est le PLASTIMENT® BV 40, un plastifiant réducteur d'eau commercialisé par SIKA. Ce produit est introduit directement dans l'eau de gâchage pour améliorer la maniabilité des mélanges et réduire la consommation d'eau. Ses principales caractéristiques techniques sont résumées dans le Tableau II.8

**Tableau II.8** Caractéristiques de l'adjuvant PLASTIMENT® BV 40 (25)

Propriété	Valeur
Aspect	Liquide brun foncé
Densité	1,180 ± 0,025
Ph	4,5 ± 1
Extrait sec	38,5 ± 1,9 %
Teneur en Na <sub>2</sub> O éq	≤ 2 %
Teneur en ions Cl <sup>-</sup>	≤ 0,1 %
Plage d'utilisation	0,3 à 1 %
Mode d'emploi	Introduire dans l'eau de gâchage

## I.8 CONCLUSION

Ce chapitre a permis de présenter en détail les matériaux employés : ciment, sédiments calcinés, perlite, fillers calcaires, sable normalisé et adjuvant, pour la préparation de mortiers à substitutions partielles. Cette identification constitue une étape essentielle pour aborder l'étude expérimentale des performances des mortiers envers l'attaque acide et la carbonatation.

# **CHAPITRE II**

## **METHODES EXPERIMENTALES**

## CHAPITRE II : METHODES EXPERIMENTALES

### II.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la description des protocoles expérimentaux adoptés dans le cadre de cette recherche, qui vise à évaluer les performances de mortiers intégrant des additions minérales alternatives. Les matériaux étudiés comprennent la vase calcinée issue des sédiments de dragage du barrage de Chorfa II, la perlite naturelle et les fillers calcaires, utilisés en substitution partielle du ciment. Ces matériaux ont été sélectionnés pour leurs potentiels environnementaux et techniques, notamment en termes de durabilité et de performances mécaniques. L'ensemble des formulations de mortiers étudiées a été préparé par Achour, qui a également pris en charge la réalisation des essais à l'état frais et des essais mécaniques. En complément, on a réalisé les essais de durabilité, incluant la carbonatation et les attaques acides. Ces derniers ont été menés sur une période de neuf semaines, afin d'observer l'évolution de la résistance des mortiers exposés à des environnements agressifs, notamment les milieux acides ( $H_2SO_4$ ).

Cette approche expérimentale croisée permet de mieux comprendre l'influence des additions minérales sur les propriétés des mortiers, et plus particulièrement sur leur comportement à long terme face aux agents de dégradation. Les résultats obtenus visent à appuyer l'hypothèse selon laquelle la valorisation des sédiments de dragage et autres ajouts minéraux peut contribuer à la fabrication de mortiers à la fois performants, durables et plus respectueux de l'environnement.

### II.2 FORMULATION DES MORTIERS

Selon la norme EN 196-1, le mortier de référence est constitué de  $450 \text{ kg/m}^3$  de ciment, trois parts de sable normalisé et une demi-part d'eau, soit un rapport eau/liant (E/L) de 0,5. Pour les mortiers élaborés avec des additions minérales, une partie du ciment Portland est substituée par des sédiments calcinés, de la perlite et des fillers calcaires, tout en conservant les mêmes quantités de sable et d'eau. Cette méthode de formulation permet de fixer la quantité d'eau et de réduire l'effet réducteur d'eau des additions, afin de limiter le nombre de variables modifiées simultanément. Les taux de substitution massique testés incluent 0% (mortier témoin), conformément aux études antérieures de Hadj Sadok (31). Le taux de substitution optimal en sédiments calcinés, estimé à 15%, a été retenu pour obtenir les meilleures

performances. Pour la perlite et les fillers calcaires, des taux de substitution de 5 % et 15 % ont été initialement considérés.

Pour les essais de durabilité, seules cinq formulations de mortiers réalisées par Achour ont été retenues, conformément aux besoins de l'étude. Le **tableau II.9** présente en détail les compositions de ces cinq formulations à base de sédiments calcinés, perlite et filler calcaire.

**Tableau II.9** Composition des mortiers témoins et mortiers avec additions (sédiments, perlite, fillers calcaires) (25)

Mortier	CEM I 42,5 (g)	SD (g)	PE (g)	FC (g)	Sable (g)	Eau de gâchage (g)	BV40 (g)	E/L	Remarque
MT	450	0	0	0	1350	225	0	0,5	Mortier témoin, sans additions
M15S	382,5	67,5	0	0	1350	223,09	1,91	0,5	15 % sédiments
M15SD5P	360	67,5	22,5	0	1350	222,8	2,2	0,5	15 % sédiments + 5 % perlite
M15SD15FC	315	67,5	0	67,5	1350	223,3	1,70	0,5	15 % sédiments + 15 % filler calcaire
M15SD15FC 5P	292,5	67,5	22,5	67,5	1350	223,19	1,81	0,5	15 % sédiments + 5 % perlite + 15 % filler calcaire

### II.3 ESSAIS DURABILITE

Pour les essais de durabilité, notamment les attaques acides et la carbonatation, nous avons utilisé des éprouvettes prismatiques de dimensions 40×40×160 mm<sup>3</sup>. Ces éprouvettes, âgées de 2 ans au moment des essais, ont été préalablement préparées par Achour [25] selon des formulations normalisées. Au total, 15 éprouvettes ont été prélevées parmi ces mortiers, correspondant aux 5 formulations suivantes :

- Mortier témoin (MT)
- 15 % sédiments (15SD)
- 15 % sédiments + 5 % perlite (15SD + 5P)
- 15 % sédiments + 15 % filler calcaire (15SD + 15FC)
- 15 % sédiments + 15 % filler calcaire + 5 % perlite (15SD + 15FC + 5P)

Sur les 15 éprouvettes sélectionnées, 10 ont été dédiées aux essais d'attaque acide et 5 aux essais de carbonatation.



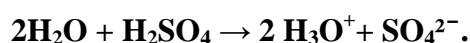
**Figure II.6** Les éprouvettes des mortiers testés

### II.3.1 Essais d'attaques acides

L'essai de la résistance aux attaques acides consiste à suivre l'évolution de la masse des échantillons de mortiers immergés dans une solution saturée en acide (2% en volume). Des essais d'immersion dans une solution d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) ont été effectués pour évaluer la résistance des différentes formulations de mortiers.

#### II.3.1.1 Acide sulfurique ( $H_2SO_4$ )

L'acide sulfurique est un composé chimique de formule  $H_2SO_4$ . C'est un acide minéral fort, il est miscible à l'eau en toutes proportions, où il se dissocie en libérant des cations hydroniums.



#### II.3.1.2 Préparation des solutions

Avant l'immersion, les éprouvettes ont été soigneusement séchées à l'air libre et pesées pour obtenir la masse initiale  $M_0$ . (Figure II.7)

On prépare d'abord la solution et on pèse nos éprouvettes. Ensuite, on les place soigneusement l'une après l'autre, en laissant un espace entre elles pour éviter le contact direct et permettre une bonne circulation de la solution. Pour garantir que la solution atteigne

toutes les parties des éprouvettes, un filet est placé au fond des bacs. Les solutions sont renouvelées chaque semaine pendant une durée de neuf semaines.



**Figure II.7** (a) Essuyage des éprouvettes (b) masse initiale des éprouvettes

On prépare d'abord la solution et on pèse nos éprouvettes. Ensuite, on les place soigneusement l'une après l'autre, en laissant un espace entre elles pour éviter le contact direct et permettre une bonne circulation de la solution. Pour garantir que la solution atteigne toutes les parties des éprouvettes, un filet est placé au fond des bacs. Les solutions sont renouvelées chaque semaine pendant une durée de neuf semaines.

- **Bac 1** : contient deux éprouvettes de mortier témoin (MT) et deux éprouvettes de mortier 15 % sédiments calcinés (15SD). (Figure II.8)



**Figure II.8** Bac 1 des mortiers

- **Bac 2** : contient deux éprouvettes de mortier 15SD+5P, deux éprouvettes de mortier 15SD+15FC et deux éprouvettes de mortier 15SD+15FC+5P.(figure II.9)



**Figure II.9** Bac 2 des mortiers

### ***II.3.1.3 Calculs des volumes de solution acide et des volumes d'acide sulfurique à ajouter***

#### ***Volume des éprouvettes***

Chaque éprouvette mesure 40 mm × 40 mm × 160 mm, ce qui correspond à 4 cm × 4 cm × 16 cm = 256 cm<sup>3</sup>.

Dans le Bac 1, il y a 4 éprouvettes

$$4 \times 4 \times 16 = 256 \times 4 = 1024 \text{ ml}$$

Le volume total est 1024 mL

Dans le Bac 2, il y a 6 éprouvettes

$$4 \times 4 \times 16 = 256 \times 6 = 1536 \text{ ml}$$

Le volume total est 1536 mL

On utilise un volume de solution égal au double du volume total des éprouvettes pour que toutes les faces soient bien immergées.

**Bac 1 :**  $2 \times 1024 = 2048 \text{ mL}$  de solution.

**Bac 2 :**  $2 \times 1536 = 3072 \text{ mL}$  de solution.

#### ***Volume d'acide sulfurique pur à ajouter***

Pour calculer la quantité d'acide à ajouter, on multiplie le volume de solution par la proportion d'acide pur dans 1000 mL.

**Bac 1 :**

$$\frac{2048 \times 20.62}{100} = 42.17 \text{ ml}$$

Donc 42,2 mL d'acide pur à ajouter dans le bac 1.

**Bac 2 :**

$$\frac{3072 \times 20.62}{100} = 63.34 \text{ ml}$$

Donc 63,3 mL d'acide pur à ajouter dans le bac 2.

#### ***II.3.1.4 La perte de masse***

Les éprouvettes des mortiers de formulation TM et à base de sédiments calcinés (15SD), perlite (5P) et fillers calcaires (15FC) ont été immergées dans une solution d'acide sulfurique ( $\text{H}_2 \text{SO}_4$ ) à 2 % en volume. Les éprouvettes ont été pesées avant immersion pour déterminer

leur masse initiale ( $M_0$ ), puis à des intervalles réguliers chaque semaine, pendant 9 semaines, pour évaluer le pourcentage de perte de masse. Chaque semaine, la solution d'attaque acide a été renouvelée pour garantir la constance des conditions d'attaque (figure II.10). Le pourcentage de perte de masse est calculé pour chaque échantillon afin d'évaluer la durabilité des différentes formulations de mortier face à l'agression acide.

Avant chaque renouvellement de la solution, les éprouvettes ont été soigneusement essuyées puis laissées à l'air libre pour permettre un séchage naturel. Cette étape garantit une élimination de l'excès d'humidité à la surface des éprouvettes, assurant ainsi des mesures de masse précises et une immersion homogène lors de la remise en solution. (Figure II.11)



**Figure II.10** Éprouvettes après retrait de la solution acide ( $H_2SO_4$ ) et en cours de séchage



**Figure II.11** Ré-immersion des éprouvettes dans une nouvelle solution d'acide ( $H_2SO_4$ )

### II.3.2 Essais de carbonatation

#### *Mesure de la profondeur de carbonatation par la phénolphtaléine*

Les 5 éprouvettes préparées par Achour (23), correspondant aux formulations TM, 15SD, 15SD + 5P, 15SD + 15FC, et 15SD + 15FC + 5P, ont été utilisées pour la mesure de la profondeur de carbonatation. Une surface fraîchement cassée a été obtenue en fendant longitudinalement des carottes de mortier pour chaque éprouvette, en veillant à ce que la surface soit propre et non contaminée. Une solution de phénolphthaléine à 1 % (diluée dans de l'éthanol) a été appliquée sur la surface fraîchement exposée, soit par pulvérisation, soit à l'aide d'un pinceau. Après quelques instants, la réaction a été observée : la partie non carbonatée est devenue rose (zone alcaline), tandis que la partie carbonatée est restée incolore. La profondeur de la zone incolore a été mesurée à plusieurs endroits sur chaque éprouvette afin d'obtenir une valeur moyenne représentative de la profondeur de carbonatation.

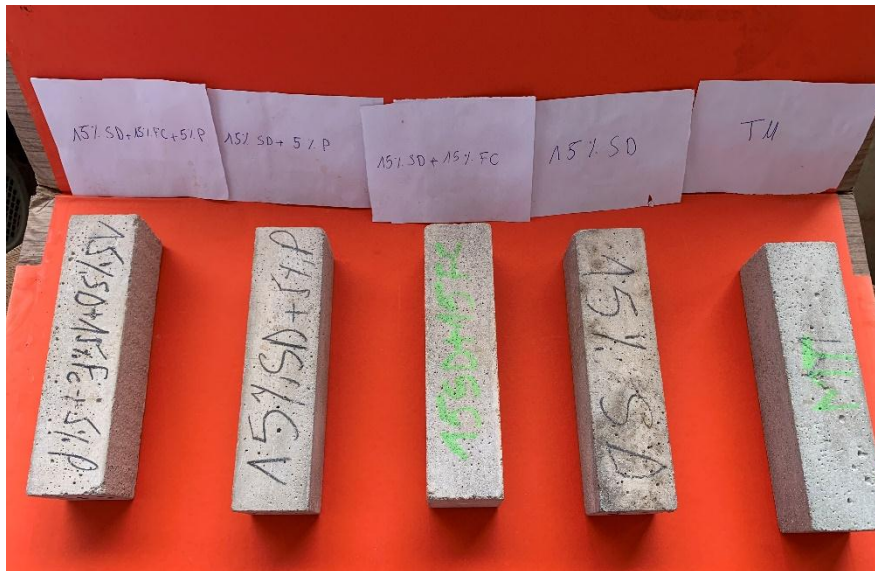


Figure II.12 Éprouvettes avant cassage pour la mesure de la profondeur de carbonatation



Figure II.13 Réaction des éprouvettes après application de la phénolphtaléine



Figure II.14 Schéma illustrant le principe des mesures (32)

## II.4 CONCLUSION

Ce chapitre a permis de présenter de manière détaillée les protocoles expérimentaux mis en œuvre pour évaluer les performances des mortiers intégrant des additions minérales alternatives. Les formulations testées ont été soumises à des essais de durabilité rigoureux, en particulier les attaques acides et la carbonatation. Les conditions expérimentales ont été soigneusement définies, notamment en ce qui concerne la préparation, la conservation et les modes de mesure des éprouvettes, afin de garantir des résultats fiables et comparables. Les essais ont permis d'identifier les différences de comportement entre les formulations, en mettant en lumière l'effet protecteur ou non des additions minérales face aux environnements agressifs. Cette méthodologie expérimentale rigoureuse constitue la base solide sur laquelle reposent les analyses des performances des mortiers qui seront présentées dans le prochain chapitre.

# **CHAPITRE III**

## **RESULTATS**

### III.1. INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre des essais de durabilité réalisés sur des mortiers contenant différentes additions minérales. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de la perlite, des sédiments de dragage et du filler calcaire sur la résistance des mortiers exposés à des environnements chimiques agressifs, en particulier en milieu acide et carbonaté. Les formulations ont été soumises à une immersion prolongée dans une solution d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) à 2 % durant une période de 9 semaines. Les pertes de masse ont été mesurées régulièrement afin de suivre l'évolution de la dégradation. Parallèlement, des essais de carbonatation ont été menés dans le but d'évaluer la pénétration du dioxyde de carbone dans la matrice cimentaire des différentes compositions. Les résultats obtenus permettent de comparer la performance des formulations étudiées face aux deux mécanismes de dégradation : l'attaque acide et la carbonatation. Cette analyse contribue à mieux comprendre le comportement des matériaux cimentaires en conditions sévères et propose des pistes d'optimisation pour améliorer la durabilité des mortiers dans les ouvrages exposés à des environnements agressifs.

### III.2. RESULTATS DES ATTAQUES ACIDES

#### III.2.1 Perte de masse

L'essai de résistance à l'attaque acide consiste à suivre l'évolution de la masse des échantillons de mortier immergés dans une solution d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) à 2 % en volume. Ce protocole permet de simuler un environnement agressif représentatif des conditions rencontrées dans certains ouvrages d'assainissement ou milieux industriels.

La durabilité des formulations est évaluée physiquement à travers la variation de masse au cours du temps, mesurée de façon hebdomadaire pendant une période de neuf semaines (**figures II.10/II.11/II.12**). En complément, une observation visuelle des échantillons est réalisée afin de relever les éventuelles détériorations apparentes telles que le ramollissement de surface, la fissuration ou la perte d'intégrité.

Ce suivi permet ainsi de comparer l'efficacité des différentes additions minérales (perlite, sédiments, filler calcaire) dans la réduction de la dégradation des mortiers soumis à une attaque acide prolongée.

**Tableau II.10** Évolution de la masse (g) des mortiers immergés dans une solution d'acide sulfurique ( $H_2 SO_4$ ) à 2 % sur une période de 9 semaines

Formulation	Masse initiale	1 S	2 S	3 S	4 S	5 S	6 S	7 S	8 S	9 S
TM	579,5	561,6	525,4	479,3	440,7	402,4	364,5	327,2	292,1	252,8
TM	577,7	563,4	524,6	479,8	438,6	403,5	362,0	322,3	286,2	261,5
15 % SD	578,5	562,7	527,1	485,7	442,9	402,2	364,7	325,4	294,1	260,4
15 % SD	579,4	562,1	528,4	487,9	441,3	406,0	361,8	327,7	292,1	259,2
15 % SD + 5 % P	571,3	559,1	522,9	471,8	431,4	396,9	393,0	357,3	325,2	289,9
15 % SD + 5 % P	569,5	559,8	526,6	469,7	430,4	392,8	392,3	359,1	321,1	293,3
15 % SD + 15 % FC	579,6	571,9	549,9	507,0	466,9	433,9	349,3	314,9	280,8	249,1
15 % SD + 15 % FC	579,7	573,7	553,2	510,1	473,1	438,4	349,5	309,6	277,0	241,9
15 % SD + 15 % FC + 5 % P	567,7	565,4	550,9	513,3	477,8	448,1	403,5	373,4	336,7	304,2
15 % SD + 15 % FC + 5 % P	572,1	567,8	551,7	508,3	475,5	446,8	403,7	368,9	342,8	305,7

- TM : Mortier témoin (sans addition minérale).
- 15 % SD : Mortier contenant 15 % de sédiments de dragage en substitution du ciment.
- 15 % SD + 5 % P : Mortier avec 15 % de sédiments + 5 % de perlite.
- 15 % SD + 15 % FC : Mortier avec 15 % de sédiments + 15 % de filler calcaire.
- 15 % SD + 15 % FC + 5 % P : Mortier avec 15 % de sédiments + 15 % de filler calcaire + 5 % de perlite.

**Tableau II.11** La masse (g) moyenne des mortiers de même composition

Semaine	TM	15 %	15 % SD +	15 % SD + 15 %	15 % SD + 15 % FC +
---------	----	------	-----------	----------------	---------------------

		<b>SD</b>	<b>5 % P</b>	<b>FC</b>	<b>5 % P</b>
<b>M<sub>0</sub></b>	578.6	579.0	570.4	579.6	569.9
<b>S1</b>	562.5	562.4	559.4	572.8	566.6
<b>S2</b>	525.0	527.8	524.8	551.6	551.3
<b>S3</b>	479.6	486.8	470.7	508.6	510.8
<b>S4</b>	439.6	442.1	430.9	470.0	476.7
<b>S5</b>	403.0	404.1	394.9	436.2	447.5
<b>S6</b>	363.3	363.3	392.7	349.4	403.6
<b>S7</b>	324.8	326.6	358.2	312.3	371.2
<b>S8</b>	292.1	294.1	325.2	280.8	336.7
<b>S9</b>	252.8	259.8	291.6	245.5	305.0

Selon la procédure de la norme ASTM C 267: les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau pour éliminer le béton altéré, puis on les laisse à l'air libre pendant 30 mn pour procéder ensuite à la pesée. Cette opération est effectuée après chaque semaine d'immersion et cela pendant 9 semaines (ASTM C 267), Selon les recommandations des normes en vigueur, la solution acide est renouvelée après chaque nouvelle pesée. La variation de la masse de chaque éprouvette est calculée à partir de l'équation suivante :

$$VM\% = \left( \frac{M_0 - M_i}{M_0} \right) \times 100$$

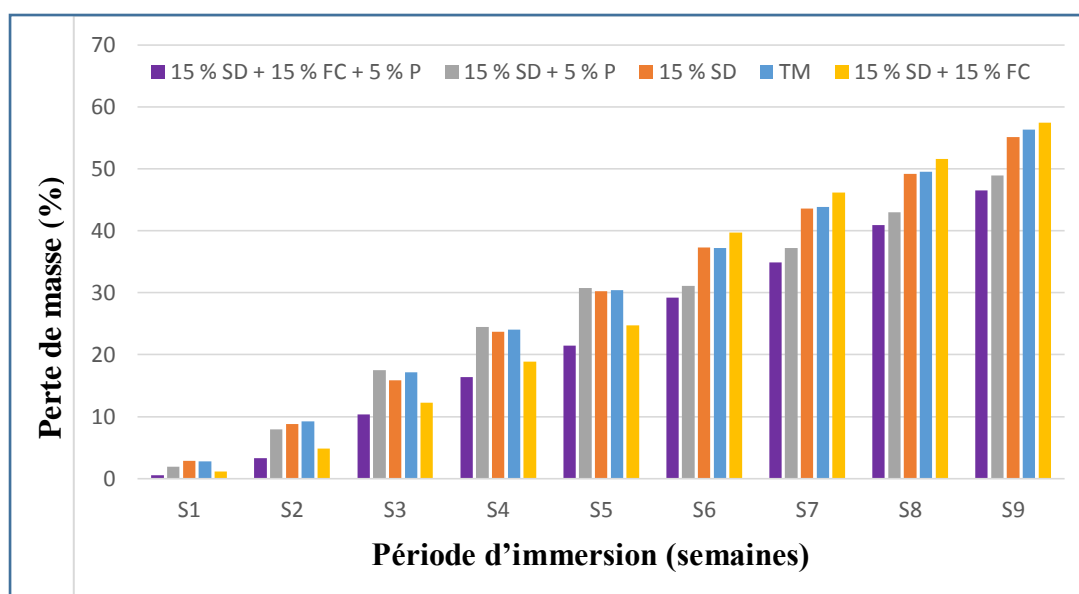
Avec :

- $M_0$  : masse initiale du mortier avant exposition (en grammes),
- $M_i$  : masse finale du mortier après exposition et séchage (en grammes),
- $V_{M\%}$  : variation de masse exprimée en pourcentage.

Le tableau II.12 ainsi que la figure associée (figure II.15) présentent l'évolution de la perte de masse (%) des différentes formulations de mortier exposées à un environnement acide sur une durée de 9 semaines, mettant en évidence les différences de comportement en fonction des additions utilisées (sédiments, perlite et fillers calcaires).

**Tableau II.12** Évolution de la perte de masse (%) des différentes formulations de mortier au cours des 9 semaines d'exposition

Semaine / Mortier	TM	15 % SD	15 % SD + 5 % P	15 % SD + 15 % FC	15 % SD + 15 % FC + 5 % P
S1	2,78	2,87	1,92	1,18	0,58
S2	9,27	8,81	7,98	4,83	3,27
S3	17,20	15,91	17,47	12,24	10,38
S4	24,02	23,68	24,49	18,91	16,36
S5	30,37	30,23	30,75	24,74	21,43
S6	37,21	37,26	31,12	39,72	29,23
S7	43,87	43,60	37,24	46,13	34,85
S8	49,52	49,21	42,99	51,55	40,92
S9	56,31	55,13	48,88	57,40	46,48



**Figure II.15** Evolution de la perte de masse des mortiers à base de perlite en fonction de la période d'immersion dans la solution d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

## II.2.2 Analyse de l'évolution de la perte de masse des mortiers en milieu acide (H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> )

A partir de la **figure II.15** :

### *Semaine 1*

Dès la première semaine, le mortier témoin (TM) et celui contenant 15 % de sédiments (SD) montrent une perte de masse relativement élevée, respectivement de 2,78 % et 2,87 %, traduisant une sensibilité immédiate à l'environnement agressif. En revanche, les formulations contenant de la perlite (P) et/ou des fillers calcaires (FC) présentent de moindres pertes,

notamment la combinaison SD + FC + P avec seulement 0,58 %, ce qui suggère un effet protecteur dès les premiers stades d'attaque.

### *Semaine 2*

La perte de masse s'accroît pour toutes les formulations. Le TM atteint 9,27 % tandis que les mortiers avec perlite et fillers calcaires confirment leur meilleure tenue (3,27 % pour SD + FC + P). Ces résultats indiquent que la perlite et les fillers contribuent à limiter la pénétration des agents acides en améliorant la compacité de la matrice.

### *Semaine 3*

Le TM et les formulations à base de SD et P montrent une hausse significative de la perte de masse (jusqu'à 17,47 % pour SD + P), ce qui traduit un début de dégradation accélérée. À l'inverse, les mortiers incorporant FC et FC + P résistent mieux (respectivement 12,24 % et 10,38 %), indiquant que le filler calcaire joue un rôle d'agent de blocage des pores ou de neutralisation partielle des acides.

### *Semaine 4*

On observe une divergence plus marquée : le TM et le SD + P dépassent les 24 % de perte, alors que le mortier SD + FC + P ne perd que 16,36 %. L'effet synergique des fillers calcaires et de la perlite devient de plus en plus évident, réduisant significativement l'attaque acide.

### *Semaine 5*

La cinétique de dégradation se poursuit : TM (30,37 %) et SD + P (30,75 %) sont les plus affectés. La formulation SD + FC + P continue de montrer une résistance notable avec seulement 21,43 % de perte. Ces différences s'expliquent par une meilleure microstructure conférée par l'ajout combiné de P et FC.

### *Semaine 6*

La formulation SD + FC connaît une augmentation brutale de la perte (39,72 %), probablement due à une saturation de sa capacité de résistance chimique. Toutefois, SD + FC + P limite mieux la dégradation (29,23 %), montrant une durabilité accrue. Les formulations sans FC, elles, commencent à se stabiliser.

### *Semaine 7*

La perte de masse augmente pour toutes les formulations, mais le TM reste le plus sensible (43,87 %). Le mortier SD + FC + P conserve son avantage (34,85 %), suggérant un effet continu de protection.

### *Semaine 8*

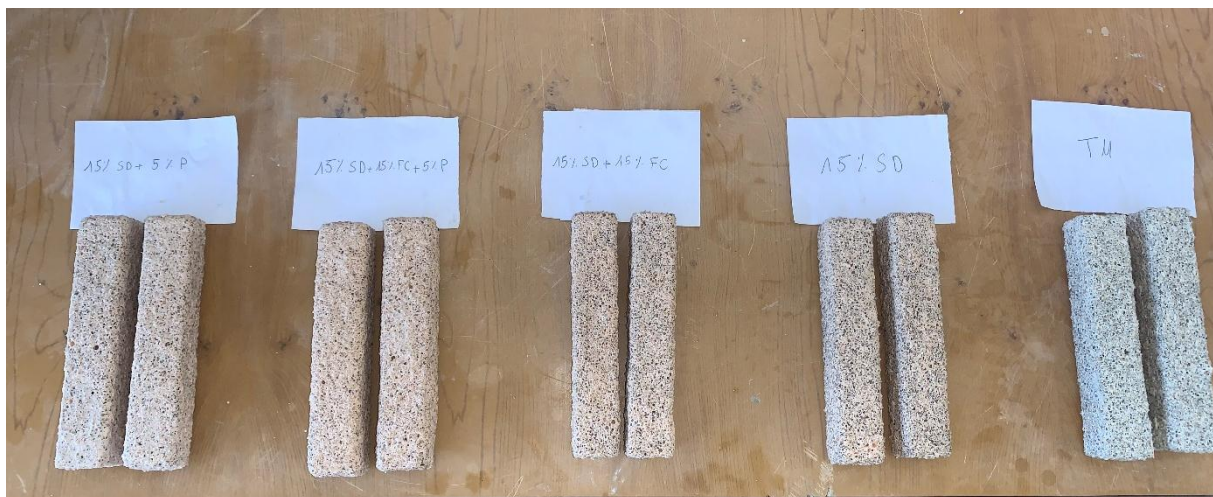
Le TM dépasse les 49 % de perte. Les formulations avec FC et P, en particulier SD + FC + P (40,92 %), présentent encore une meilleure stabilité, probablement grâce à une porosité plus fermée et à une réduction de la solubilité des hydrates en milieu acide.

### *Semaine 9*

- Le 15 % SD + 15 % FC devient de plus en plus vulnérable, dépassant même la perte de masse du TM à S6 et S7, et presque identique à S9.
- Ce comportement indique que l'absence de perlite dans cette formulation la rend moins résistante à long terme.
- La formulation 15 % SD + 15 % FC + 5 % P reste la plus résistante tout au long de l'exposition.
- La présence de perlite améliore clairement la durabilité grâce à sa réactivité pouzzolanique et à la formation de gels C-S-H secondaires.



**Figure II.16** Les éprouvettes après 1 semaine d'immersion dans la solution d'acide  $H_2SO_4$



**Figure II.17** Les éprouvettes après 9 semaines d'immersion dans la solution d'acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Les résultats obtenus sur l'évolution de la perte de masse des mortiers exposés pendant 9 semaines à un milieu acide à base d'acide sulfurique confirment clairement le rôle protecteur des additions minérales vis-à-vis de l'agression acide.

Le mortier témoin (TM), sans additions, montre la perte de masse la plus importante, traduisant une vulnérabilité accrue face à la pénétration des ions H<sub>3</sub> O<sup>+</sup> et SO<sub>4</sub> <sup>2-</sup>, ainsi qu'à la lixiviation des composés hydratés du ciment. Cela s'explique par la forte porosité capillaire de la pâte, facilitant la migration des agents agressifs et la dissolution progressive de la portlandite (CH) et des phases C-S-H.

À l'inverse, les formulations contenant 15 % de sédiments calcinés (SD), 5 % de perlite (P) ou 15 % de fillers calcaires (FC) affichent une réduction notable de la perte de masse. Cette amélioration de la durabilité s'explique par plusieurs mécanismes synergiques :

- Les additions fines améliorent la compacité de la matrice en comblant les pores capillaires (effet filler).
- Certaines additions, comme les SD et la perlite, peuvent développer une activité pouzzolanique, consommant la portlandite pour former des C-S-H secondaires plus stables et moins solubles en milieu acide.
- Le filler calcaire peut également participer à la formation de phases carbonatées plus résistantes à la lixiviation.

La formulation contenant 15 % SD + 15 % FC + 5 % P présente les performances les plus élevées. Ce résultat peut être attribué à une densification optimisée de la microstructure et à une baisse significative de la porosité accessible aux ions agressifs. Le rôle de la perlite, en tant que matériau léger et réactif, est ici complémentaire : sa microstructure poreuse et sa richesse en silice amorphe favorisent la formation de gels C-S-H additionnels, tout en contribuant à limiter la propagation des fissures internes dues à l'expansion des produits de réaction (ex. : gypse, ettringite secondaire).

Ces observations sont en parfaite cohérence avec les travaux de Mersali & Slamani (20), qui ont étudié la durabilité de mortiers contenant différents taux de perlite (10 %, 15 %, 20 %, 25 %) soumis à un environnement acide. Ils ont démontré que l'augmentation du pourcentage de perlite permet de réduire la dégradation chimique induite par l'acide sulfurique. Les pertes de masse dans leur étude étaient systématiquement inférieures dans les mortiers contenant de la perlite comparée au témoin, confirmant le rôle protecteur de cette addition.

En résumé, l'incorporation judicieuse d'additions minérales permet de renforcer la barrière physique et chimique contre l'agression acide, en limitant la dissolution des hydrates, la pénétration des acides et en stabilisant la structure de la pâte cimentaire.

### III.3. RESULTATS DE CARBONATATION

Les profondeurs de carbonatation mesurées sur les différentes formulations de mortiers sont présentées dans le tableau II.14 et la figure II.18. Ces mesures ont été effectuées après application de la phénolphthaléine sur les surfaces fraîchement cassées des éprouvettes.

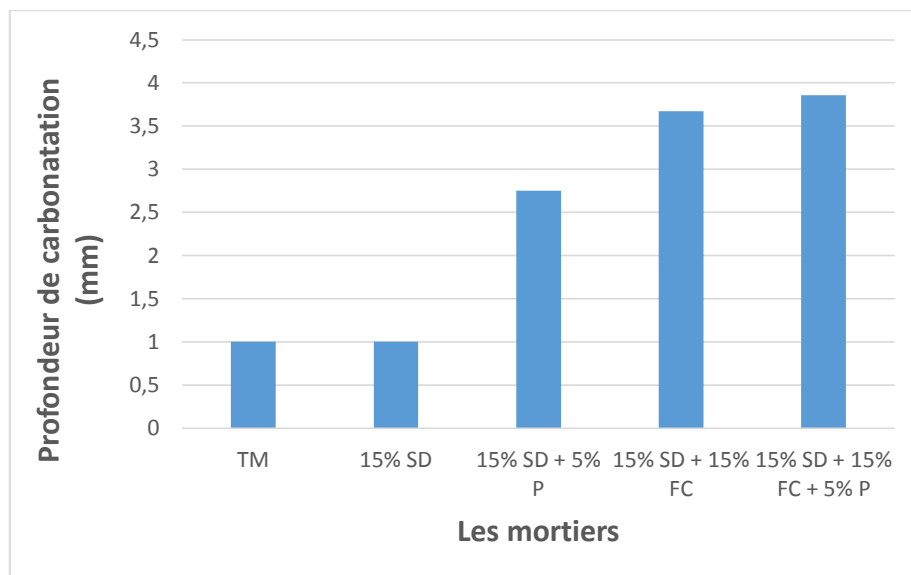
**Tableau II.13** Tableau des profondeurs mesurées de carbonatation (mm).

N° de mesure	TM	15% SD	15% SD + 5% P	15% SD + 15% FC	15% SD + 15% FC + 5% P
1	1	1	2	5	4
2	1	1	2	5	4
3	1	1	3	4	3
4	—	—	4	3	5
5	—	—	—	3	3
6	—	—	—	2	5
7	—	—	—	—	3

**Remarque :** Les cases marquées « — » correspondent aux faces entièrement colorées en rose après application de la phénolphthaléine, ce qui indique l'absence de carbonatation sur ces zones. Par conséquent, aucune mesure de profondeur n'a pu être prise sur ces faces.

**Tableau II.14** Les résultats des mesures de profondeur de carbonatation pour chaque formulation de mortier

Mortier	Profondeur (mm)	Min (mm)	Max (mm)
<b>TM</b>	1.00	1	1
<b>15% SD</b>	1.00	1	1
<b>15% SD + 5% P</b>	2.75	2	4
<b>15% SD + 15% FC</b>	3.67	2	5
<b>15% SD + 15% FC + 5% P</b>	3.86	3	5



**Figure II.18** Les résultats des mesures de profondeur de carbonatation pour chaque formulation de mortier



**Figure II.19** Résultats visuels de carbonatation

On remarque dans la figure II.18 les formulations TM et 15% SD montrent une carbonatation très faible (1 mm), ce qui traduit une bonne résistance. L'ajout de perlite et/ou de filler calcaire augmente progressivement la profondeur de carbonatation, surtout à partir de la combinaison 15% SD + 15% FC + 5% P. Plus la profondeur est élevée, plus le matériau est vulnérable à la carbonatation dans des environnements riches en  $\text{CO}_2$ .

Les résultats obtenus dans notre étude montrent que la profondeur de carbonatation augmente de manière significative avec l'ajout combiné de sédiments de dragage (SD), de filler calcaire (FC) et de perlite (P). La formulation contenant 15 % SD + 15 % FC + 5 % P présente la profondeur de carbonatation la plus élevée, traduisant une vulnérabilité accrue face à l'attaque du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ).

Ces observations sont en accord avec les travaux de Katz (33), qui ont démontré que la réduction importante du taux de ciment, par substitution avec des additions fines, entraîne une augmentation marquée de la carbonatation. En particulier, ils ont observé qu'au-delà d'un taux de substitution de 50 %, les échantillons sont totalement carbonatés, en raison d'une diminution de la réserve alcaline (hydroxyde de calcium) et d'une hausse de la porosité capillaire.

Dans notre cas, bien que la teneur totale en additions reste inférieure à 50 %, la combinaison simultanée de SD, FC et P génère un effet cumulatif négatif sur la compacité de la matrice cimentaire.

Cette combinaison :

- Diminue la quantité de ciment actif et donc la formation de portlandite (CH),
- Introduit une quantité importante de particules fines favorisant une microstructure plus poreuse,
- Et, dans le cas d'un rapport E/L élevé, accentue l'évaporation de l'eau libre, créant des vides facilitant la pénétration du CO<sub>2</sub> .

Par ailleurs, comme le souligne Rozière (34), le volume de la pâte défini comme la somme de l'eau efficace et du volume des fines joue un rôle déterminant dans la durabilité des bétons. Ce volume constitue le siège principal des réactions chimiques, notamment la carbonatation. Une pâte trop abondante ou trop poreuse favorise la pénétration du CO<sub>2</sub> et accélère les mécanismes de dégradation. Ainsi, la porosité du béton étant directement liée à celle de la pâte, un excès d'additions minérales non réactives peut accroître la sensibilité du matériau à la carbonatation.

En conclusion, ces résultats confirment que la substitution excessive du ciment par des matériaux finement divisés, même en dessous de 50 %, peut compromettre la durabilité des mortiers face à la carbonatation, si les ajouts ne sont pas suffisamment réactifs ou s'ils dégradent la structure poreuse du matériau.

#### III.4 CONCLUSION

Les essais de durabilité menés sur les différentes formulations de mortiers ont permis d'évaluer leur comportement face à deux environnements agressifs : les milieux acides et la carbonatation. Les résultats ont montré que les mortiers contenant uniquement des sédiments calcinés (15 % SD) présentent une bonne résistance aussi bien aux attaques acides qu'à la carbonatation, comparable à celle du mortier témoin. En revanche, l'ajout de perlite (5 %) et de filler calcaire (15 %) a entraîné une augmentation progressive de la perte de masse en milieu acide, ainsi qu'une profondeur de carbonatation plus importante.

Ces observations indiquent que, bien que la perlite et le filler calcaire puissent offrir des avantages en termes de propriétés mécaniques ou thermiques (25), ils peuvent aussi réduire la durabilité des mortiers face à certains agents agressifs. Il apparaît ainsi que le mortier intégrant uniquement 15 % de sédiments calcinés constitue un compromis intéressant entre durabilité et substitution partielle du ciment.

## CONCLUSION GENERALE

Les résultats obtenus au terme de ce travail de recherche confirment le potentiel des additions minérales (sédiments, perlite et fillers calcaires) comme matériaux de substitution partielle du ciment Portland dans les mortiers. Chacune de ces additions a montré des effets spécifiques selon la nature de l'agression considérée : la perlite a révélé une efficacité notable contre les attaques acides chlorhydriques, les fillers calcaires ont contribué à améliorer la compacité et à réduire la porosité, tandis que la vase calcinée a permis une valorisation locale d'un résidu jusque-là peu exploité.

Les formulations ternaires étudiées ont permis d'obtenir des performances intéressantes en matière de durabilité, ce qui souligne la pertinence de ces ajouts dans des formulations de mortiers respectueuses de l'environnement. Toutefois, leur efficacité dépend fortement des conditions d'activation, des proportions d'incorporation et des caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés.

Ce mémoire ouvre ainsi la voie à des perspectives encourageantes pour la réduction de l'empreinte carbone des matériaux de construction et la promotion de solutions durables, basées sur l'utilisation de ressources locales et de sous-produits valorisables. Des études complémentaires à plus grande échelle, notamment sur le comportement à long terme en conditions réelles d'exposition, permettront de consolider ces résultats et d'envisager une application industrielle à large échelle.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) Neville, A. M. (2012). *Properties of Concrete* (5th Edition). Pearson Education Limited.
- (2) Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- (3) Kachemir, L., & Benkraraz, A. (2022). *Caractérisation de la perlite de Hammam Boughrara pour l'isolation thermique et phonique* [Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib d'Ain Témouchent].
- (4) Rashad, M. A. (2016). A synopsis about perlite as building material – A best practice guide for civil engineers. *Construction and Building Materials*, 121, 338–353.
- (5) Ferk (2012). *Guide méthodologique : Valorisation des sédiments de dragage en béton*. Démarche SEDIMATERIAUX.
- (6) Meral, Ç. (2004). *Use of perlite as a pozzolanic addition in blended cement production* [Thèse de Master, Middle East Technical University, Turkey].
- (7) Hamadache, M. (2018). *Résistances mécaniques, conductivité et résistance à la corrosion des pouzzolaniques* [Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique, Mauritanie].
- (8) Hamadache, M. (2017). *Étude de la valorisation de la perlite naturelle de Hammam Boughrara dans les matériaux de construction* [Mémoire de Master, Université de Tlemcen].
- (9) USGS. (2025). *Mineral Commodity Summaries – Perlite*.
- (10) Guenanou, F., Khelafi, H., & Aattache, A. (2019). Behavior of perlite-based mortars on physicochemical characteristics, mechanical and carbonation: Case of perlite of Hammam Boughrara. *Journal of Building Engineering*, 24, 100734.
- (11) LSUNMA. (1999). *Livret des substances utiles non métalliques de l'Algérie de la Wilaya de...*
- (12) Belaribi, O., Safer, O., Belas, N., Belguesmia, K., & Hadj Sadok, R. (2024). Influence de la perlite sur le comportement mécanique, l'absorption capillaire et la conductivité thermique des mortiers. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 10(3), 18800.
- (13) Guenanou, F. (2018). *Durabilité des mortiers contenant la perlite vis-à-vis* [Thèse de doctorat en sciences].
- (14) Amar, M., Benzerzour, M., Abriak, N., & Maherzi, W. (2016). Étude de valorisation des sédiments de dragage. *Academic Journal of Civil Engineering*, 34(1), 882–889.
- (15) L'Est Républicain. (2016). *Le dragage de la Saône*.

- (16) CEN. (2013). *EN 12620: Aggregates for concrete*. European Committee for Standardization.
- (17) Amar, M., Benzerzour, M., Abriak, N., & Maherzi, W. (2016). Étude de valorisation des sédiments de dragage. *Academic Journal of Civil Engineering*, 34(1), 882–889.
- (18) Bendahoua, Y., & Goudjil, B. (2015). *Gestion et caractérisation de sédiments de dragage du barrage de Bouhanifia* [Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret].
- (19) Thiéry, M., & Dangla, P. (2007). Modelling of carbon dioxide diffusion in hydrated cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1047–1058.
- (20) Slamani, A., & Mersali, C. (2023). *Durabilité des mortiers à base de perlite (10 %, 15 %, 20 %, 25 %) aux attaques acides (HCl, H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub>)* [Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem].
- (21) Senhadji, Y., Escadeillas, G., Mouret, M., & Khelafi, H. (2015). Durabilité des bétons de granulats recyclés : impact de la carbonatation. *Revue des sciences de l'eau*, 28(2), 123–137.
- (22) Thiéry, M. (2006). *Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires*. Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LPC, OA 52.
- (23) Kaid, N., Cyr, M., Julien, S., & Khelafi, H. (2010). Durabilité des mortiers de ciments composés contenant de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf : influence sur la carbonatation. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, 20(1), 61–73.
- (24) Piolet, É. (2023). Étude de la carbonatation des matériaux cimentaires à base d'un ciment à forte teneur en laitier de haut fourneau. In *CFGC 2023 – Prix René Houpert, AJCE*, 41(1), 784–791.
- (25) Achour, M. (2025). *Évaluation environnementale et économique pour la valorisation des sédiments de dragage dans le domaine du génie civil en Algérie* [Thèse de doctorat, Centre universitaire Nour Bachir - El Bayadh].
- (26) Semcha, A. (2006). *Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug* [Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne].
- (27) Belaribi, O. (2015). *Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane* [Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem].
- (28) Belguesmia, K. (2018). *Optimisation d'un éco-BAP à base de sédiment de dragage vis-à-vis des états frais, durci et de la durabilité* [Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem].
- (29) Taieb, F. (2019). *Contribution à l'étude du retrait des mortiers de béton autoplaçant équivalent à base de sédiments de dragage*.

- (30) **Hadj Sadok, R. (2019).** *Analyse du cycle de vie des sédiments de dragage* [Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem].
- (31) **Hadj Sadok, R., Belas, N., Tahlaiti, M., & Mazouzi, R. (2021).** Reusing calcined sediments from Chorfa II dam as partial replacement of cement for sustainable mortar production. *Journal of Building Engineering*, 40, 102273.
- (32) **Falih Rafie Moro, Ghomari F., Boukli Hacène M. A., Taleb O., Loukili A., & Rosière E. (2011).** *La carbonatation des bétons aux fortes additions calcaires*. Université Abou Bakr Belkaid, Laboratoire Eau et Ouvrages dans leur Environnement, Tlemcen, Algérie & Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique – UMR CNRS 6183, École Centrale de Nantes, France.
- (33) **KATZ Amnon, Baum Hadassa 2006;** Effect of high levels of fines content on concrete properties ACI Materials journal, November – December 2006.
- (34) **Roziere E. (2007)** ; Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, France, Novembre.
- (35) **Neville, A. M. (2012).** **Properties of Concrete (5<sup>e</sup> éd.).** Pearson Education Limited.
- (36) **Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014).** *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4<sup>e</sup> éd.).* McGraw-Hill Education.
- (37) **NF EN 206-1. (2014).** Béton – Spécification, performances, production et conformité. AFNOR.
- (38) **Rashad, M. A. (2016).** A synopsis about perlite as building material. *Construction and Building Materials*, 121, 338–353.
- (39) **Grube, H., & Rechenberg, W. (1989).** Sulfate attack on cement-bound building materials—mechanisms and resistant binders. *Zement-Kalk-Gips (ZKG International)*, 42(9), 442–446.
- (40) **Ollivier, J. P., & Vichot, A. (2008).** *La durabilité des bétons*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 251 p.

**(41) Zivica, V., & Bajza, A. (2001).** Acidic attack of cement based materials – a review. *Construction and Building Materials*, **15**(8), 331–340. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00012-7)

**(42) Zivica, V., & Bajza, A. (2002).** Resistance of cement-based materials against magnesium and calcium salts. *Construction and Building Materials*, **16**(5), 265–268. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00012-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00012-0)